



PROJETO DE GRADUAÇÃO

RALO-REGENERADOR PARA CHUVEIRO

Por
Isabel Kodama Correa de Moraes

Brasília, 09 de dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

RALO REGENERADOR PARA CHUVEIRO

POR

Isabel Kodama Correa de Moraes

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora

Prof. Mário Olavo Magno de Carvalho, UnB/ ENM (Orientador) _____

Prof. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, UnB/ ENM _____

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, UnB/ ENM _____

Brasília, 09 de dezembro de 2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, que sempre me orientou e foi essencial para eu chegasse aonde estou. Ela sempre fez parte de toda a minha trajetória de crescimento pessoal e profissional e, graças a todo convívio, apoio e carinho, viemos juntos conquistando muitas vitórias.

Agradeço aos meus amigos que crescemos juntos e que a cada dia me surpreendem com seus enormes corações. Ao meu ver, eles são os melhores que eu poderia ter e espero que continuemos por muito tempo compartilhando vivências e cultivando essa amizade. Obrigada aos meus amigos e colegas de curso, que convivi durante toda a graduação. Sem dúvidas foram anos muito difíceis, mas passar por tantos desafios com essa companhia foi o diferencial. Ficarei muito feliz de poder encontrá-los futuramente no ambiente de trabalho.

Obrigada a todos os professores e funcionários que estiveram presentes em toda essa jornada e a todos que fizeram parte diretamente deste projeto. Agradeço àqueles que contribuíram não só para a minha formação acadêmica, mas que souberam repassar ensinamentos para a vida. Seus esforços e dedicações são fonte de inspiração para todos.

Quero agradecer à minha companheirinha de 16 anos, que sempre foi um cantinho de paz, tranquilidade e companheirismo. Aprendi muito com ela e seu coraçãozinho que só cabe amor. Vivemos tantas mudanças na vida e sem dúvida a sua presença me transformou como ser humano e trouxe mais alegria pra nossa casa.

Isabel Kodama Correa de Moraes

RESUMO

Uma parcela significativa da energia elétrica produzida no Brasil é consumida por chuveiros elétricos que não apresentam uma boa eficiência exergética. Por conta disso, estudos com regeneradores aplicados a chuveiros são desenvolvidos para reaproveitar parte da energia térmica desperdiçada no banho.

Este projeto visa complementar os estudos de regeneradores com configuração helicoidal de tubos concêntricos colocados junto ao ralo de coleta de água servida. Foi agregado um chuveiro com regulador automático de temperatura, que em associação com o regenerador reduz o consumo de energia elétrica e água.

Uma bancada experimental foi construída, contendo o regenerador e um chuveiro com controle automático de temperatura, através da qual se observou o desempenho da tecnologia, contribuindo para a economia de energia elétrica e água.

A partir de uma análise de viabilidade econômica, o conjunto de regenerador e chuveiro com regulador automático de temperatura se mostrou viável economicamente, quando comparado ao conjunto 'chuveiro e ralo convencionais'.

ABSTRACT

The electric power produced in Brazil is mostly consumed by exergy-inefficient electric showers. Therefore, studies on regenerators combined with electric showers are developed to reuse part of the thermal energy and water wasted during showers.

This graduation project aims to complement studies of regenerators with helical configuration of concentric tubes, since this arrangement obtained good results. An electric shower with automatic power regulator was added to the system, that in association with the drain was able to reduce electricity and water consumption.

An experimental bench was built containing a regenerator and an electric shower with automatic temperature control. The association of two technologies, regenerators drain with helical configuration of concentric tubes and electric shower with automatic power regulator, contributed to power and water saving.

Hence, the economic feasibility analysis concluded that the set of regenerator and electric shower with automatic power regulator is economically feasible when compared to the conventional set of drain and electric shower.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 3 |
| 1.3 METODOLOGIA..... | 4 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR | 6 |
| 2.4 TROCADORES DE CALOR..... | 8 |
| 2.4.1 Coeficiente Global de Transferência de Calor | 9 |
| 2.4.2 Análise de Trocadores de Calor | 11 |
| 2.4.2.1 Trocador de Calor com Escoamento em Paralelo | 12 |
| 2.4.2.2 Trocador de Calor com Escoamento em Contracorrente | 14 |
| 2.4.2.3 Trocador de Calor Casco e Tubos com Escoamento em Contracorrente | 15 |
| 2.4.3 O Método da Efetividade-NUT | 16 |
| 2.5 Queda de Pressão..... | 17 |
| 2.5.1 Fator de Atrito..... | 17 |
| 2.5.2 Conexões | 17 |
| 2.5.3 Tubos Helicoidais | 18 |
| 2.6 CHUVEIROS | 19 |
| 2.6.1 Chuveiro Elétrico | 19 |
| 2.6.2 Chuveiro com Regulador Automático de Temperatura..... | 19 |
| 2.7 AVALIAÇÃO ECONÔMICA | 20 |
| 3 REGENERADOR DE CALOR..... | 23 |
| 3.1 TROCADOR DE CALOR HELICOIDAL DE TUBOS CONCÊNTRICOS | 23 |
| 3.2 REGIME TRANSIENTE | 24 |
| 3.3 CONSTRUÇÃO DO REGENERADOR..... | 25 |
| 3.3.1 Dimensões e Materiais | 25 |
| 3.3.2 Etapas de Construção | 26 |
| 4 EQUIPAMENTOS E BANCADA EXPERIMENTAL..... | 32 |
| 4.1 EQUIPAMENTOS..... | 32 |
| 4.1.1 Chuveiro Com Regulador Automático de Temperatura | 32 |
| 4.1.2 Hidrômetro | 33 |
| 4.1.3 Sensor de Temperatura | 34 |
| 4.1.4 Sensor de Corrente..... | 35 |
| 4.1.5 Manômetro..... | 36 |
| 4.1.6 Módulo de Aquisição de Dados | 37 |
| 4.1.7 Placa Arduino Programada Para Calcular a Corrente RMS | 38 |
| 4.2 BANCADA EXPERIMENTAL | 39 |
| 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL..... | 43 |
| 5.1 INTRODUÇÃO | 43 |
| 5.2 ETAPA 1: REGIME PERMANENTE..... | 46 |
| 5.2.1 PERDA DE CARGA | 49 |

| | | |
|--|---------------------------------------|-----------|
| 5.3 | ETAPA 2: REGIME TRANSIENTE | 50 |
| 5.4 | ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA | 58 |
| 5.5 | ANÁLISE DE ERRO / INCERTEZA..... | 63 |
| CONCLUSÃO E OBSERVAÇÕES FINAIS..... | | 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 70 |
| APÊNDICE..... | | 72 |
| ANEXOS..... | | 85 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1.1.(a) Consumo de energia elétrica brasileiro no ano de 2016(Fonte: MME,2017) e (b) Desenvolvimento da camada limite de velocidade sobre uma placa plana (Fonte: EPE, 2010) | 2 |
| 2.1.Ilustração de um tubo em formato de serpentina helicoidal e o escoamento secundário do seu interior em uma vista da seção transversal (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 7 |
| 2.2.Trocadores de tubos concêntricos com (a) escoamento paralelo e (b) escoamento em contracorrente (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 8 |
| 2.3.Trocadores de calor com escoamentos cruzados (a) aletado com ambos os fluidos não-misturados e (b) não-aletado com um fluido misturado e o outro não-misturado(Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 8 |
| 2.4.Trocador de calor casco e tubos com escoamento em contracorrente (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 9 |
| 2.5.Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 10 |
| 2.6.Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série-paralela (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 11 |
| 2.7.Balances de energia globais para os fluidos quente e frio de um trocador de calor com dois fluidos (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 12 |
| 2.8.Distribuição de temperatura em um trocador de calor com escoamento em paralelo (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 13 |
| 2.9.Distribuição de temperatura em um trocador de calor com escoamento em contracorrente (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado) | 14 |
| 2.10.Distribuição de temperatura em um trocador de calor casco e tubos de dois passes com escoamento em contracorrente (Fonte: Lakhani, 2018) | 15 |
| 2.11.Representação do escoamento em casos de (a) expansão brusca e (b) contração brusca..... | 18 |
| 2.12.Fluxo de caixa de um empreendimento energético, em que, I representa o custo do investimento inicial, CM o custo de manutenção e operação, CC o custo do insumo energético, VS o valor do subproduto, R o valor residual do investimento ao fim da vida útil da instalação e v a vida útil do empreendimento (Fonte: Carvalho, 2005) | 21 |
| 2.13.Fluxo de caixa de um empreendimento energético com reposição sucessiva ao final da vida útil (Fonte: Carvalho, 2005) | 21 |
| 3.1.(a) Modelagem do ralo-regenerador e (b) plano de corte do ralo-regenerador | 23 |
| 3.2.Movimentos da água no interior do ralo-regenerador | 24 |
| 3.3.Componentes do ralo-regenerador | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.4.Caixa sifonada de 250 mm x 172 mm..... | 27 |
| 3.5.Processo de fabricação das espirais no tubo de cobre | 28 |
| 3.6.Espirais do regenerador | 28 |
| 3.7.Posicionamento dos tubos de PVC nas espirais..... | 29 |
| 3.8.Vista superior do regenerador..... | 30 |
| 3.9.Vista lateral do regenerador | 30 |
| 3.10.Tampa do ralo-regenerador | 31 |
| 3.11.Conexões da tubulação de cobre, da esquerda para a direita: porca de ½ pol, anilha de ½ pol e união de ½ pol x ½ pol | 31 |
| 4.1.Ducha sensorial My Shower fabricada por Exatron (Fonte: https://www.tecmundo.com.br/curiosidade/104650-myshower-conheca-primeira-ducha-sensorial-brasil.htm)..... | 33 |
| 4.2.Hidrômetro da marca Saga e modelo US-3,0 (Fonte: http://www.kitcopasa.com.br/HidrometrounijatoUS3-0DN20x115mm.php)..... | 34 |
| 4.3.Sensor de temperatura LM35 (Fonte: http://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-temperatura-lm35.html)..... | 34 |
| 4.4.Sonda feita de sensores de temperaturas LM35 impermeabilizados | 35 |
| 4.5.Sensor de corrente não invasivo SCT-013-000..... | 35 |
| 4.6.Sensor de corrente não invasivo SCT-013-000 (Fonte: https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/installation) | 36 |
| 4.7.Manômetro Zürich modelo Z.10.B 3A..... | 36 |
| 4.8.Módulo CR 1000 da marca Campbell Scientific (fonte: http://www.campbellsci.es/cr1000) | 37 |
| 4.9.Placa Arduino e circuito utilizado | 38 |
| 4.10.Ilustração da bancada experimental (Autor: Mário Olavo Magno de Carvalho)..... | 39 |
| 4.11.Bancada experimental construída | 40 |
| 4.12.Esquema representativo da bancada experimental. Os números indicam os dispositivos instalados: (1) hidrômetro, (2) registro do tipo gaveta de controle de fluxo de água e (3) chuveiro. As setas correspondem ao caminho percorrido pela água | 41 |
| 4.13.Equipamentos instalados na bancada experimental | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Dimensões utilizadas para a construção do ralo-regenerador..... | 26 |
| Tabela 5.1. Procedimento experimental..... | 44 |
| Tabela 5.2. Resultados obtidos nos ensaios realizados em regime permanente..... | 47 |
| Tabela 5.3. Valores obtidos de pressão no interior da tubulação de cobre na entrada e saída do regenerador para diferentes vazões..... | 50 |
| Tabela 5.4. Resultados obtidos nos ensaios realizados em regime transiente | 54 |
| Tabela 5.5. Resultados obtidos de economia de água de acordo com a vazão e a variação de temperatura | 57 |
| Tabela 5.6. Custos de investimento inicial, custo de manutenção e valor residual dos Cenários 1 e 2..... | 59 |
| Tabela 5.7. Condições em que o Cenário 1 é vantajoso em relação ao Cenário 2 | 63 |
| Tabela 5.8. Tempo de retorno do investimento para banhos de 10 minutos de duração (Cenário 2) | 63 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | | |
|-----------|--|---------------------|
| A | Área | $[m^2]$ |
| A_t | Área da seção transversal | $[m^2]$ |
| C_q | Taxa de capacidade térmica do fluido quente | $[W/K]$ |
| C_f | Taxa de capacidade térmica do fluido frio | $[W/K]$ |
| C_{min} | Capacidade calorífica mínima | $[W/K]$ |
| c_p | Calor específico a pressão constante | $[kJ/(kg \cdot K)]$ |
| h | Coefficiente de transferência de calor por convecção | $[W/(m^2 \cdot K)]$ |
| L | Comprimento | $[m]$ |
| D, d | Diâmetro do tubo | $[m]$ |
| C | Diâmetro da serpentina | $[m]$ |
| D_h | Diâmetro hidráulico | $[m]$ |
| k | Condutividade Térmica | $[W/(m \cdot K)]$ |
| q | Energia Térmica | $[J]$ |
| i | Entalpia | $[J]$ |
| m | Massa | $[kg]$ |
| T | Temperatura | $[^{\circ}C]$ |
| Q | Calor total transferido | $[kJ]$ |
| S | Passo da serpentina | $[m]$ |
| p | Perímetro | $[m]$ |
| P | Pressão | $[Pa]$ |
| R | Resistência térmica | $[K/W]$ |
| e | Rugosidade | $[m]$ |
| U | Coefficiente global de transferência de calor | $[W/(m^2 \cdot K)]$ |
| u, v, V | Velocidade | $[m/s]$ |

Símbolos Gregos

| | | |
|---------------|---|------------|
| θ | Ângulo | $[rad]$ |
| ε | Emissividade | |
| Δ | Variação entre duas grandezas similares | |
| ρ | Densidade | $[m^3/kg]$ |

Grupos Adimensionais

| | |
|-----|--------------------------|
| f | Fator de atrito de Darcy |
|-----|--------------------------|

| | |
|--------|---|
| f_s | Fator de atrito para tubos retos |
| f_c | Fator de atrito para tubos helicoidais |
| R_d | Fator de deposição |
| $Dean$ | Número de Dean |
| Nu | Número de Nusselt |
| Re | Número de Reynolds |
| NUT | Número de unidades de transferência |
| C_r | Razão entre as taxas de capacidades caloríficas mínima e máxima |

Subscritos

| | |
|---------|-------------------|
| $cond$ | Condução |
| $conv$ | Convecção |
| cr | Crítico |
| ent | Entrada |
| f | Frio |
| $1, 2$ | Pontos |
| q | Quente |
| $máx$ | Máximo |
| m | Médio |
| sai | Saída |
| $serp$ | Serpentina |
| $total$ | Total |
| $méd$ | Média |
| ml | Média logarítmica |

Sobrescritos

- Quantidade por unidade de tempo

Siglas

| | |
|---------|------------------------------------|
| PIB | Produto Interno Bruto |
| TEP | Tonelada Equivalente de Petróleo |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia |
| IDE | Integrated Development Environment |

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O estudo de alternativas para geração de energia e a busca de eficácia no seu uso para a redução de perdas são assuntos de grande enfoque no cenário atual. Energia e desenvolvimento estão interligados de modo que o consumo energético *per capita* pode ser utilizado como um indicador de desenvolvimento de uma nação. Os dados estatísticos coletados em diversos países relacionando o consumo de energia com o desenvolvimento social mostram que a maioria dos países, cujos consumos de energia comercial *per capita* são menores que uma tonelada equivalente de petróleo (TEP) por ano, apresenta elevadas taxas de analfabetismo, mortalidade infantil e fertilidade e baixa expectativa de vida. Deste modo, observa-se que conforme o consumo de energia comercial *per capita* aumenta, as condições sociais melhoram de forma considerável (Goldemberg, 1998).

A energia elétrica é um dos tipos mais utilizados de energia no mundo. Obtém-se calor e trabalho através de sua transformação e assim o seu uso proporciona o aumento da capacidade de produção de bens e serviços e qualidade de vida. Essa relação entre economia e energia revela que, para crescer economicamente, é necessário o aumento do consumo de energia. A elasticidade-renda da demanda de eletricidade – a qual representa a relação entre o crescimento do consumo de energia elétrica e o crescimento da economia – varia conforme o grau de desenvolvimento de um país. Países que já apresentam elevados valores de PIB *per capita* possuem elasticidade-renda da demanda de energia próxima ao valor unitário, como Reino Unido, Alemanha e França. Países em desenvolvimento, como no caso do Brasil, nos quais o valor do PIB *per capita* é relativamente baixo, possuem elasticidade-renda da demanda de energia mais elevada (EPE, 2008). O setor industrial é o principal responsável por demandar essa energia e tende-se a utilizar equipamentos com maior eficiência energética em países mais desenvolvidos. Além disso, atividades que demandam muita energia, como no caso da siderurgia, são realizadas em países em desenvolvimento (ANEEL, 2008).

É importante que o planejamento do sistema elétrico seja integrado, envolvendo tanto formas de suprir a demanda, quanto de utilizar a energia, oferecendo energia suficiente para acompanhar o crescimento do país e evitando os riscos de blecaute que ocorrem principalmente em horários de pico. Melhorar a eficiência energética e utilizar racionalmente a energia é em geral economicamente mais vantajoso do que aumentar a sua produção, em razão de os custos de programas de racionalização serem normalmente menores do que os de aumento de geração. Assim, para o uso consciente, é importante levar em consideração não apenas a quantidade, mas também a qualidade da energia.

A partir do Primeiro Princípio da Termodinâmica, avalia-se a eficiência energética de um sistema relacionando a energia de entrada e a energia de uso no fim do processo. O conceito de qualidade se refere à exergia. O Segundo Princípio da Termodinâmica relaciona a energia útil com a sua capacidade de realizar trabalho, ou seja, diz respeito à eficiência exergética (Filho et al., 2000). Levando

em consideração que se gera irreversibilidades, conforme a energia é transformada, um processo com grande eficiência exergética apresenta menor degradação da energia durante o seu uso final (Brzustowski & Golem, 1977). Uma forma de ilustrar essa diferença é analisar o processo de aquecimento da água através de um chuveiro elétrico. Esse processo, onde o chuveiro recebe a água a uma temperatura baixa e a aquece para uma temperatura superior, apresenta eficiência energética superior a 95%, segundo o INMETRO¹ (2016). Já a sua eficiência exergética é de aproximadamente 7%, pois a energia elétrica que chega ao chuveiro tem uma grande capacidade de realizar trabalho, enquanto que a capacidade da água aquecida a baixa temperatura é muito pequena. Utilizar fontes compatíveis de energia, com relação à qualidade, para cada finalidade é uma maneira de elevar o rendimento exergético (Filho et al., 2000).

A parcela residencial do consumo brasileiro de energia elétrica no ano de 2016 corresponde a 23,2%, apenas atrás dos 28,7% do setor industrial, conforme ilustrado no gráfico da Figura 1.1a. Quando se trata do consumo médio dos equipamentos nas residências, estima-se que em 2019 o chuveiro elétrico será responsável por 25% da parcela residencial, como mostra o gráfico da Figura 1.1b. Assim, o consumo do chuveiro elétrico gira em torno de 6% do consumo total.

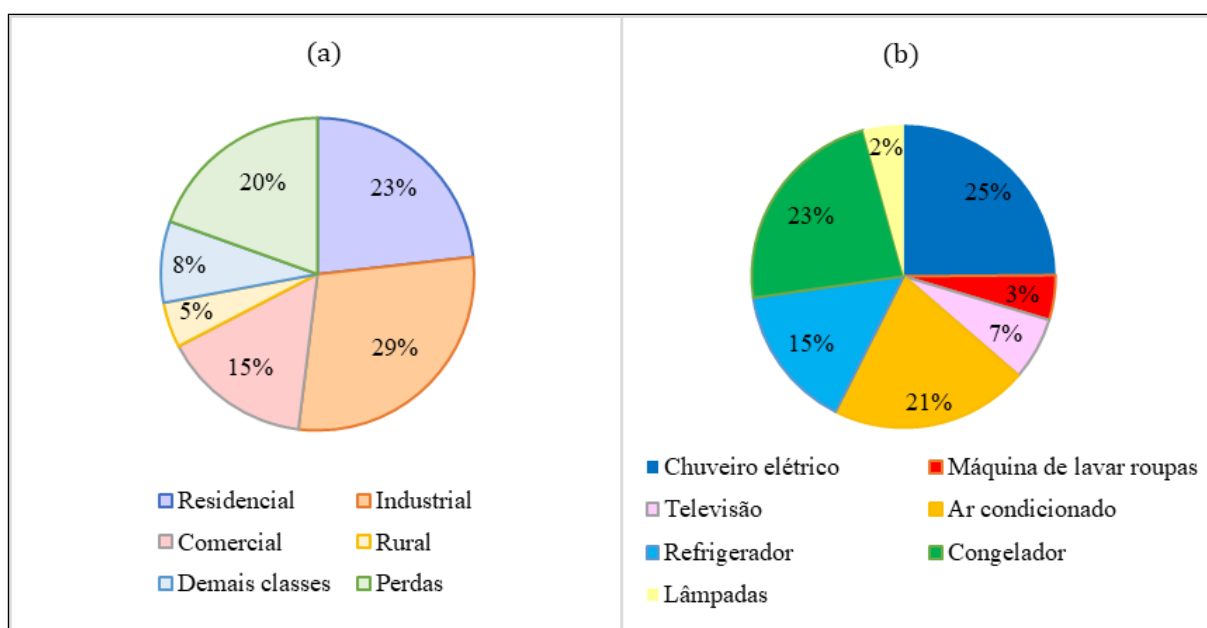


Figura 1.1. (a) Consumo de energia elétrica brasileiro no ano de 2016 (Fonte: MME, 2017) e (b) consumo médio estimado para 2019 de equipamentos nas residências brasileiras (Fonte: EPE, 2010).

Estima-se que em 2019 cerca de 75,8% dos domicílios brasileiros terá pelo menos um chuveiro elétrico (EPE, 2010). O consumidor opta pela sua utilização por ter um baixo custo de aquisição, ser de fácil instalação, operação e manutenção, de acordo com pesquisas realizadas pelos próprios fabricantes de chuveiros elétricos. O resultado disso, para as concessionárias de energia, é o superdimensionamento

¹ INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

do sistema de distribuição. A demanda residencial responde por até 40% do consumo de energia elétrica em horários de pico (durante a manhã, das 6h às 8h, e durante a tarde, das 17h às 20h). Além de aumentar as perdas nesses processos, por conta das características de alta potência em curto espaço de tempo, o preço da energia elétrica para o consumidor varia em função da demanda horária de consumo, a fim de custear a geração e estimular o consumo racional de energia elétrica (Tomé, 2014).

Apesar de o chuveiro elétrico apresentar uma elevada eficiência energética no ponto de vista elétrico, não se aproveita no banho toda a energia consumida por ele. Por conta disso, o ralo-regenerador estudado neste projeto tem o propósito de reaproveitar parte da energia que seria desperdiçada através da água descartada pelo ralo. Essa tecnologia foi avaliada por Neiva (2005), cujos resultados mostraram uma redução em torno de 30% da potência necessária para que o chuveiro proporcione um banho com uma mesma temperatura e vazão.

Associado ao regenerador, propõe-se um estudo com um chuveiro com regulador automático de temperatura, o qual permite que a seleção da temperatura do banho e ajusta automaticamente com um sistema de realimentação eletrônica a potência consumida de acordo com a temperatura da água de saída. O chuveiro proposto se mostra compatível com o ralo-regenerador por reduzir a potência consumida sem alterar a vazão, conforme a temperatura da água que o abastece é aquecida.

Uma das desvantagens de se utilizar o ralo-regenerador com um chuveiro elétrico convencional é a possibilidade de provocar um aumento do consumo água e não a redução do consumo de energia. Tendo em vista que a potência consumida por ele é constante durante todo o banho e a temperatura da água que chega ao chuveiro é elevada pelo regenerador, caso o usuário deseje uma temperatura de banho mais fria, o controle será realizado aumentando a vazão de água. Com o chuveiro proposto neste projeto, a temperatura selecionada para o banho é mantida automaticamente através da redução de sua potência e sem alterar a vazão de água.

1.2 OBJETIVOS

Para melhor utilizar a energia consumida no banho, o presente trabalho busca avaliar experimentalmente o desempenho e a viabilidade econômica de um ralo-regenerador associado a um chuveiro com regulador automático de temperatura e compará-los com um chuveiro convencional sem regenerador.

Um dos objetivos consiste em mostrar que o regenerador reaproveita da água parte da energia térmica que seria desperdiçada e permite que, juntamente com o chuveiro dotado de um regulador automático de temperatura, sejam economizadas energia elétrica e água.

Outro objetivo é construir um regenerador helicoidal em tubos concêntricos com uma configuração de escoamento predominantemente cruzado. O regenerador foi desenvolvido e testado

utilizando um chuveiro elétrico convencional por Neiva (2005), o qual trouxe uma eficiência energética em torno de 30%.

Ao associar o regenerador a um chuveiro com regulador automático de temperatura, busca-se avaliar a quantidade de energia elétrica economizada. Além disso, em particular quando em regime transiente, busca-se avaliar a quantidade de água economizada ao reduzir o intervalo de tempo necessário para que a água que sai chuveiro atinja a temperatura de banho desejada.

1.3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi elaborada uma revisão teórica acerca de transferência de calor em regime permanente, perdas de carga e análise de custos e benefícios aplicada ao tema em estudo neste projeto. Como se tem por objetivo avaliar de forma experimental o desempenho do conjunto regenerador e chuveiro com regulador automático de temperatura (Cenário 1) comparando com o uso de um chuveiro e ralo convencional (Cenário 2), confeccionou-se o regenerador de configuração helicoidal de tubos concêntricos e uma bancada de experimentos, o qual simula um *box* para banheiro e onde foram instalados o chuveiro e equipamentos necessários para a coleta de dados.

Os experimentos foram divididos em duas etapas, a primeira visou avaliar o regime permanente com a perda de carga no regenerador. A segunda, o funcionamento do sistema em regime transiente. Ao manter fixa a vazão do escoamento, o período permanente se estabelece quando as temperaturas da água em cada ponto da montagem experimental não se alteram com o decorrer do tempo. Portanto, nesta fase, foram verificadas as temperaturas da água que sai do chuveiro e as das entradas e saídas do regenerador e a potência do chuveiro em ambos os cenários estudados, permitindo a análise da eficiência do regenerador em regime permanente. A eficiência verificada corresponde à razão entre as potências consumidas pelo chuveiro no Cenário 2 e no Cenário 1, guardadas as mesmas condições de vazão e temperaturas de entrada da rede e do banho. Ainda nesta fase, foram determinada a perda de carga no regenerador relativa às vazões utilizadas. Para tanto, foi feita a instalação de um manômetro na entrada e saída do regenerador.

O período transiente corresponde ao intervalo em que as temperaturas de cada ponto do experimento variam com o passar do tempo. Nesta fase experimental, foram aferidas as temperaturas e a potência do chuveiro em função do tempo e verificada, além da eficiência do regenerador, o tempo de duração do regime transiente, para que, posteriormente, fosse avaliada a quantidade de água economizada.

A partir dos resultados, foi realizada uma avaliação econômica do cenário em que se utiliza o regenerador com o chuveiro dotado de regulador automático de temperatura, através do método

desenvolvido por Carvalho (2005). Dessa forma, foi possível observar as condições nas quais este cenário se mostrou vantajoso em relação ao que usa o chuveiro e o ralo convencionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito quando há um gradiente de temperatura no espaço. Ela pode acontecer por meio de três processos: condução, convecção e radiação. De forma geral, a transferência de calor por condução ocorre quando se tem um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. A convecção ocorre quando o gradiente de temperatura está entre uma superfície e um fluido em movimento. A radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas em qualquer superfície com temperatura não nula, porém a sua taxa de transferência de calor somente apresenta valores relevantes para temperaturas elevadas.

A intensidade da transferência de calor varia com o número de Reynolds, que representa a razão entre as forças de inércia e as viscosas e, a partir dele, pode-se verificar se o escoamento está em regime laminar ou turbulento. Para um escoamento plenamente desenvolvido em tubo reto e circular, o número de Reynolds pode ser definido da seguinte forma:

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (1)$$

em que u_m é a velocidade média do fluido na seção transversal e D é o diâmetro do tubo.

Quando o Reynolds é pequeno e abaixo do valor crítico do escoamento, as forças de inércia são muito menores que as forças viscosas, assim o escoamento se mantém no regime laminar. Quando o Reynolds é grande, ultrapassando o valor crítico do escoamento, as forças de inércia são muito maiores que as forças viscosas, iniciando a transição para a turbulência.

No caso de escoamento em tubo reto e circular, o número de Reynolds crítico é de aproximadamente 2300, embora sejam necessários números de Reynolds em torno dos 10000 para obter condições plenamente turbulentas.

O coeficiente convectivo é intensificado em escoamentos no interior de serpentinas helicoidais, quando comparada com o escoamento em tubos retos. Nessa configuração, um escoamento secundário constituído por um par de vórtices longitudinais gerados por forças centrífugas no fluido é induzido, resultando em coeficientes de transferência de calor locais não uniformes, variando com θ e com x , conforme Figura 2.1.

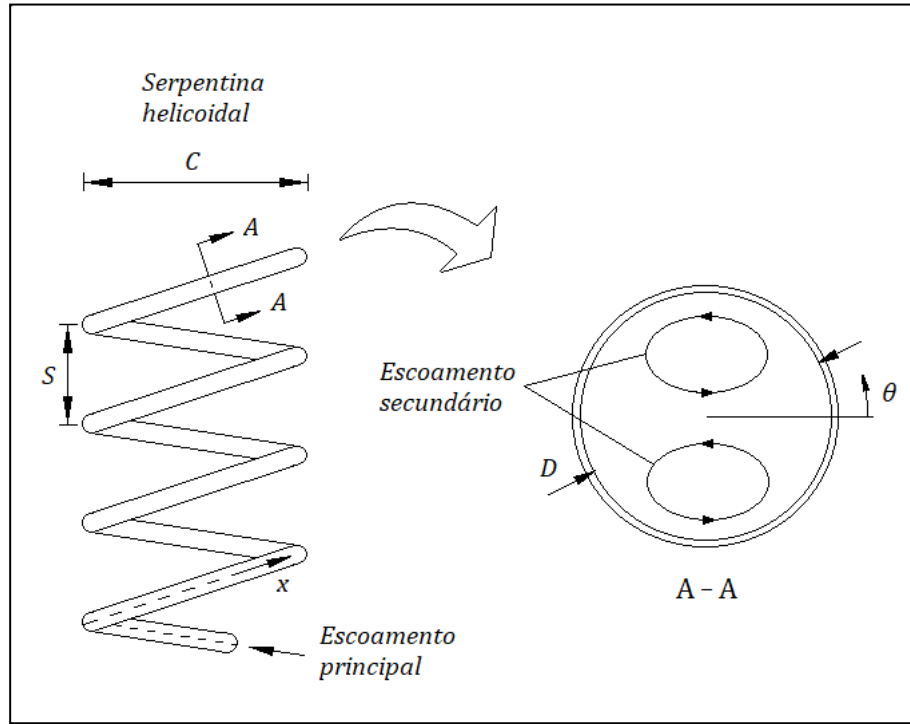


Figura 2.1. Ilustração de um tubo em formato de serpentina helicoidal e o escoamento secundário do seu interior em uma vista da seção transversal (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

O escoamento secundário provoca um aumento da taxa de transferência de calor e das perdas por atrito e a redução do comprimento de entrada (distância desde a entrada do fluido até o ponto de fusão da camada limite) e da diferença entre as taxas de transferência de calor nos regimes laminar e turbulento. O passo da serpentina, S , exerce pouca influência nas quedas de pressão e nas taxas de transferência de calor.

O número de Reynolds crítico em um escoamento turbulento no interior de serpentinas helicoidais é definido em função de D/C , em que D corresponde ao diâmetro do tubo e C ao diâmetro da serpentina helicoidal (Incropera et al., 2008).

$$Re_{cr,serp} = 2100[1 + 12(D/C)^{0,5}] \quad (2)$$

Em casos de fluxo monofásico no interior de um tubo helicoidal, o fator de atrito pode ser verificado com base nos parâmetros aplicados aos tubos retos e adotando-se um fator de correção para a aplicação em tubos helicoidais. Quando se trata de um escoamento turbulento ($Re > Re_{cr}$), o coeficiente de atrito para tubos retos (f_s), a sua relação com o coeficiente de atrito para tubos helicoidais (f_c) e o Número de Nusselt são definidos conforme as Equações 3, 4 e 5 (Huaiming et al., 2001).

$$f_s = 0,316/Re_{cr}^{0,25} \quad (3)$$

$$f_c/f_s = 1 + 0,11Re^{0,23}(D/C)^{0,14} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{f_c}{8} Re \quad (5)$$

O número de Nusselt (Nu) corresponde ao gradiente de temperatura adimensional na superfície, ou seja, fornece uma razão entre as taxas de transferência de calor por convecção e por condução.

2.4 TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor são equipamentos utilizados para efetuar a troca de calor entre dois fluidos, cujas temperaturas são diferentes. Eles apresentam diversas aplicações na engenharia, como em ar condicionado, aquecimento de ambientes e recuperação de calor em processos. Dentre as classificações possíveis de trocadores de calor, encontra-se o tipo de configuração do escoamento e a forma de construção.

Existem três tipos de classificação quanto ao tipo de configuração do escoamento: paralelo, contracorrente e cruzado. Na configuração paralelo, os fluidos entram por uma mesma extremidade, escoam em um mesmo sentido e deixam o escoamento por uma mesma extremidade (Figura 2.2a). Na configuração em contracorrente, os fluidos entram por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento em extremidades opostas (Figura 2.2b). No escoamento cruzado, um fluido escoa perpendicularmente ao outro (Figuras 2.3a e 2.3b).

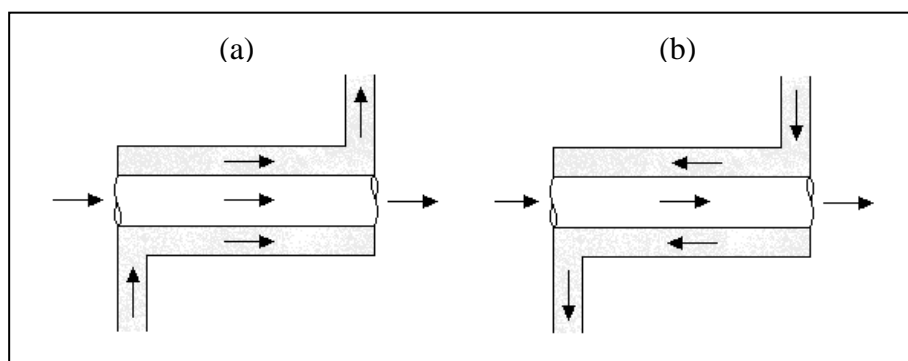


Figura 2.2. Trocadores de tubos concêntricos com (a) escoamento paralelo e (b) escoamento em contracorrente (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

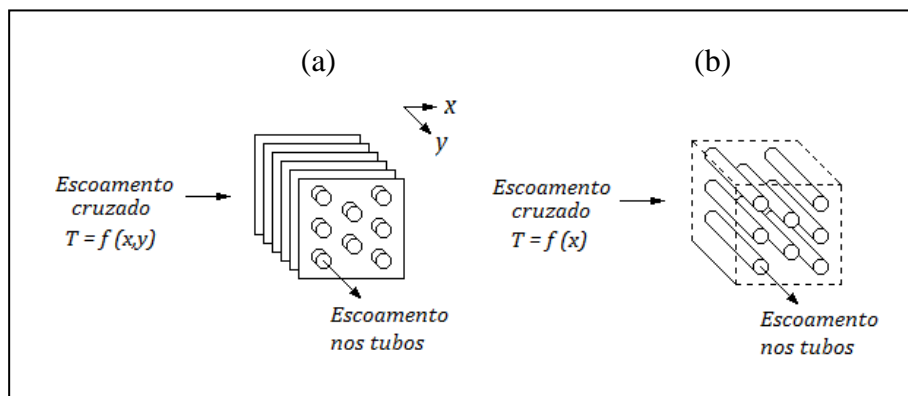


Figura 2.3. Trocadores de calor com escoamentos cruzados (a) aletado com ambos os fluidos não-misturados e (b) não-aletado com um fluido misturado e o outro não-misturado (Fonte: Incropera et al., 2008 - Adaptado).

Quanto à forma construtiva, a do trocador do tipo casco e tubos (Figura 2.4) varia de acordo com o número de passes no casco e nos tubos. Instalam-se chicanas para aumentar o coeficiente convectivo no fluido do lado do casco, induzindo turbulência e uma componente de velocidade na direção do escoamento cruzado. As chicanas também são utilizadas para apoiar os tubos e assim reduz-se a vibração causada pelo escoamento.

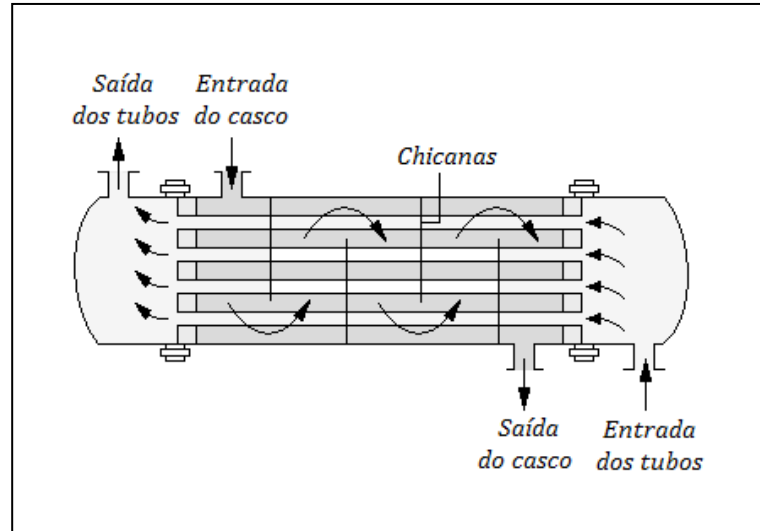


Figura 2.4. Trocador de calor casco e tubos com escoamento em contracorrente
(Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

2.4.1 Coeficiente Global de Transferência de Calor

O coeficiente global de transferência de calor (U) é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos (R_{total}) e a área em que as trocas ocorrem (A).

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{UA} \quad (6)$$

A resistência pode aumentar significativamente ao longo da operação, devido à deposição de impurezas dos fluidos nas superfícies, à formação de ferrugem ou às reações entre o fluido e o material da parede. Este aumento leva à redução do desempenho e pode ser considerado, no cálculo da resistência equivalente, utilizando um fator de deposição (R_d), o qual depende da temperatura de operação, da velocidade do fluido e do tempo de serviço. Apesar de esse fator ser tabelado, ele varia ao longo da operação do trocador de calor.

As resistências térmicas para a condução ($R_{t,cond}$) e convecção ($R_{t,conv}$) podem ser descritas das seguintes formas, em que L corresponde à espessura da camada que ocorre a condução.

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \quad (7)$$

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA} \quad (8)$$

Em sistemas de paredes compostas, situações com camadas de diferentes materiais, utiliza-se uma analogia de cálculo com os sistemas elétricos. Uma parede composta pode ter a sua distribuição de camadas em série (Figura 2.5) ou em paralelo (Figura 2.6).

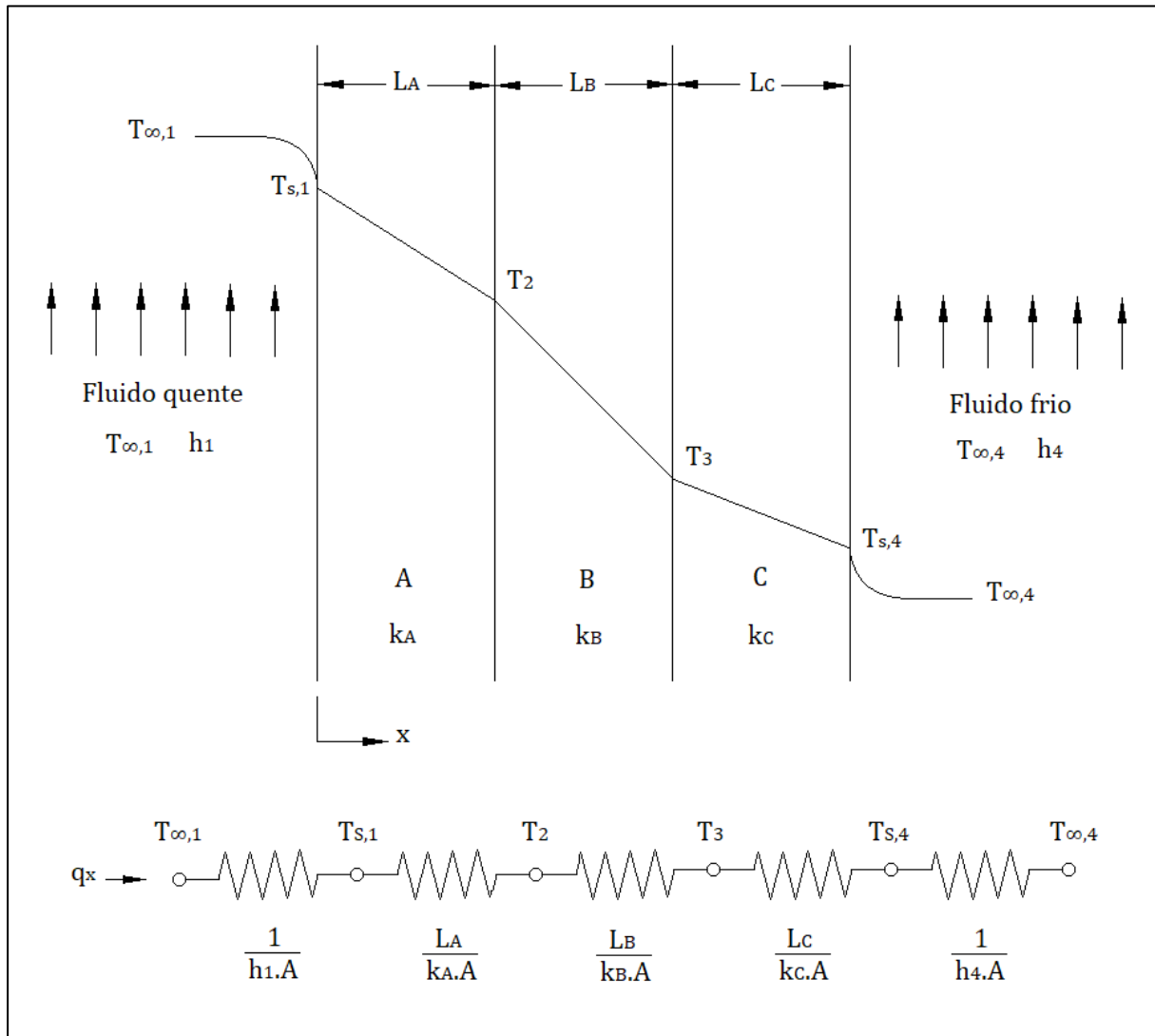


Figura 2.5. Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série
(Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

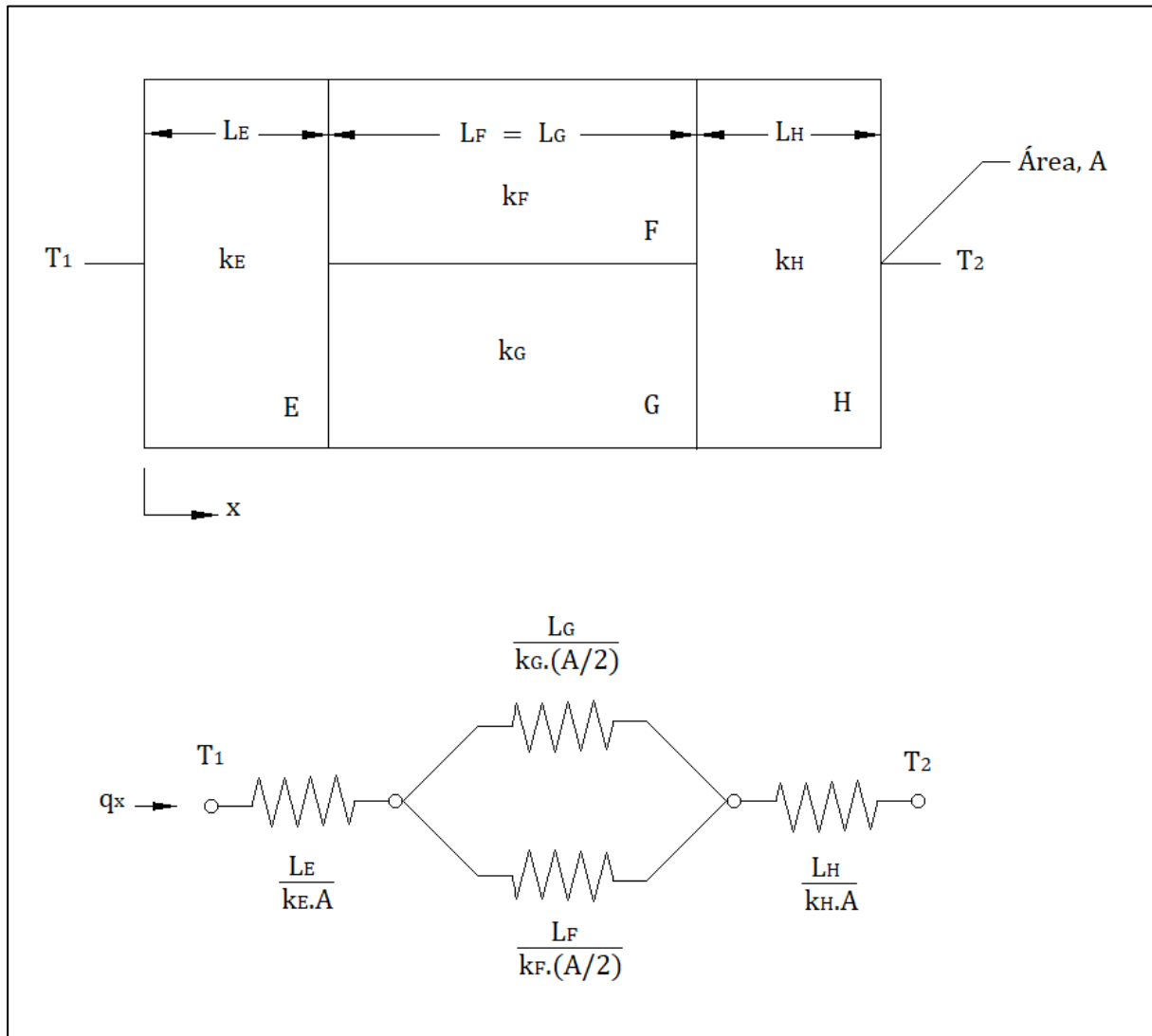


Figura 2.6. Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série-paralela
(Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

2.4.2 Análise de Trocadores de Calor

A metodologia de estudo do desempenho do trocador de calor através média logarítmica das diferenças de temperaturas se baseia nas temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, no coeficiente global de transferência de calor e na área superficial total onde ocorre a transferência de calor.

A taxa total de transferência de calor entre os fluidos quente e frio (\dot{q}) pode ser obtida por meio dos balanços globais de energia, considerando trocadores de calor, onde os fluidos não passam por uma mudança de fase e os calores específicos são constantes (Figura 2.7).

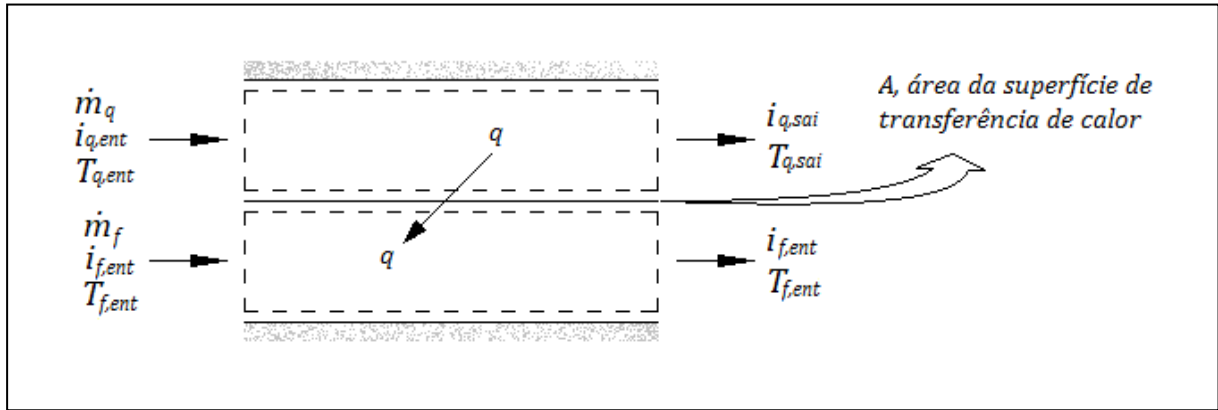


Figura 2.7. Balanços de energia globais para os fluidos quente e frio de um trocador de calor com dois fluidos (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

$$\dot{q} = \dot{m}_q (i_{q,ent} - i_{q,sai}) \quad (9)$$

$$\dot{q} = \dot{m}_f (i_{f,sai} - i_{f,ent}) \quad (10)$$

$$\dot{q} = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (11)$$

$$\dot{q} = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (12)$$

Nas Equações 9 a 12, "i" corresponde à entalpia do fluido e as temperaturas se referem às temperaturas médias dos fluidos nas localizações indicadas.

Utilizando uma extensão da lei do resfriamento de Newton, com o coeficiente global de transferência de calor (U) e uma média apropriada de diferenças de temperaturas (ΔT_{ml}), a equação para a taxa de transferência de calor pode ser escrita como:

$$q = UA\Delta T_{ml} \quad (13)$$

2.4.2.1 Trocador de Calor com Escoamento em Paralelo

Em trocadores de calor com escoamento em paralelo, a diferença de temperatura entre os fluidos quente e frio (ΔT) inicialmente é grande, mas se aproxima assintoticamente de zero, conforme x aumenta. Trocadores com este tipo de configuração são menos eficientes e a sua distribuição de temperaturas é apresentada na Figura 2.8, na qual se pode observar que a temperatura de saída do fluido frio nunca será superior à temperatura de saída do fluido quente.

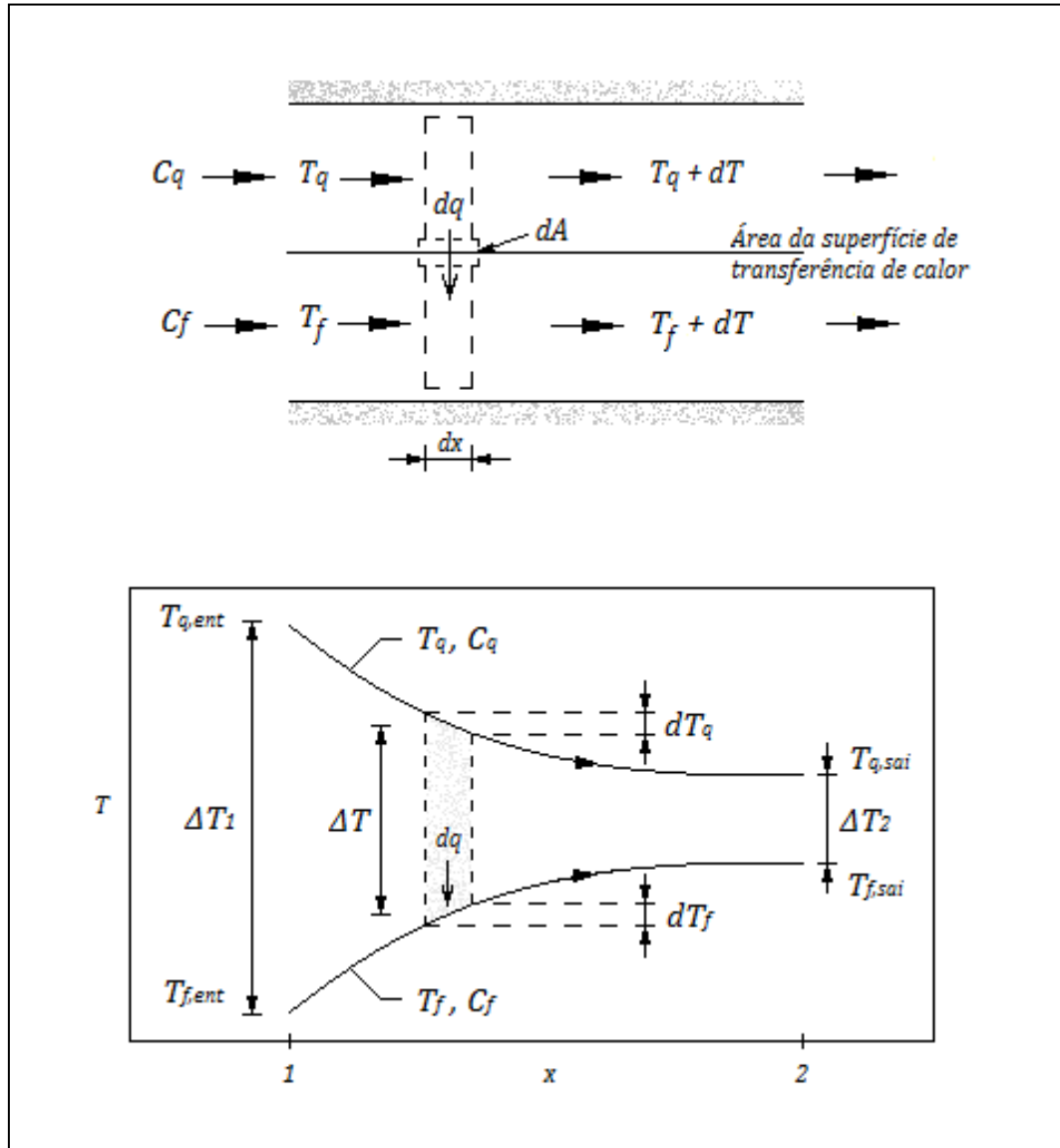


Figura 2.8. Distribuição de temperatura em um trocador de calor com escoamento em paralelo (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

Cada elemento possui um comprimento, dq , e uma área de transferência de calor, dA . As Equações 14 a 16 são baseadas em trocadores isolados termicamente com a vizinhança, nos quais a condução axial ao longo dos tubos e as mudanças de energias cinética e potencial são desprezíveis e os calores específicos dos fluidos e coeficiente global de transferência de calor são constantes.

Como o calor específico varia conforme a mudança de temperatura e o coeficiente global de transferência de calor conforme a mudança das propriedades dos fluidos e das condições do escoamento, utiliza-se valores médios de $c_{p,f}$, $c_{p,q}$ e U em situações em que essas variações não são significativas.

$$dq = -\dot{m}_q c_{p,q} dT_q \quad (14)$$

$$dq = \dot{m}_f c_{p,f} dT_f \quad (15)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (16)$$

Para trocadores com escoamento paralelo, considera-se que $\Delta T_1 = T_{q,ent} - T_{f,ent}$ e $\Delta T_2 = T_{q,sai} - T_{f,sai}$.

2.4.2.2 Trocador de Calor com Escoamento em Contracorrente

Diferentemente do trocador com escoamento em paralelo, os trocadores de calor com escoamento em contracorrente são mais eficientes e permitem que a transferência de calor ocorra entre parcelas mais quentes dos dois fluidos em uma extremidade e entre parcelas mais frias dos dois fluidos em outra extremidade. Nesta configuração de escoamento, a diferença de temperaturas não é tão elevada quanto no trocador com escoamento em paralelo e a temperatura de saída do fluido frio pode alcançar temperaturas superiores à de saída do fluido quente. Observa-se na Figura 2.9 a distribuição de temperaturas em um trocador de calor em contracorrente.

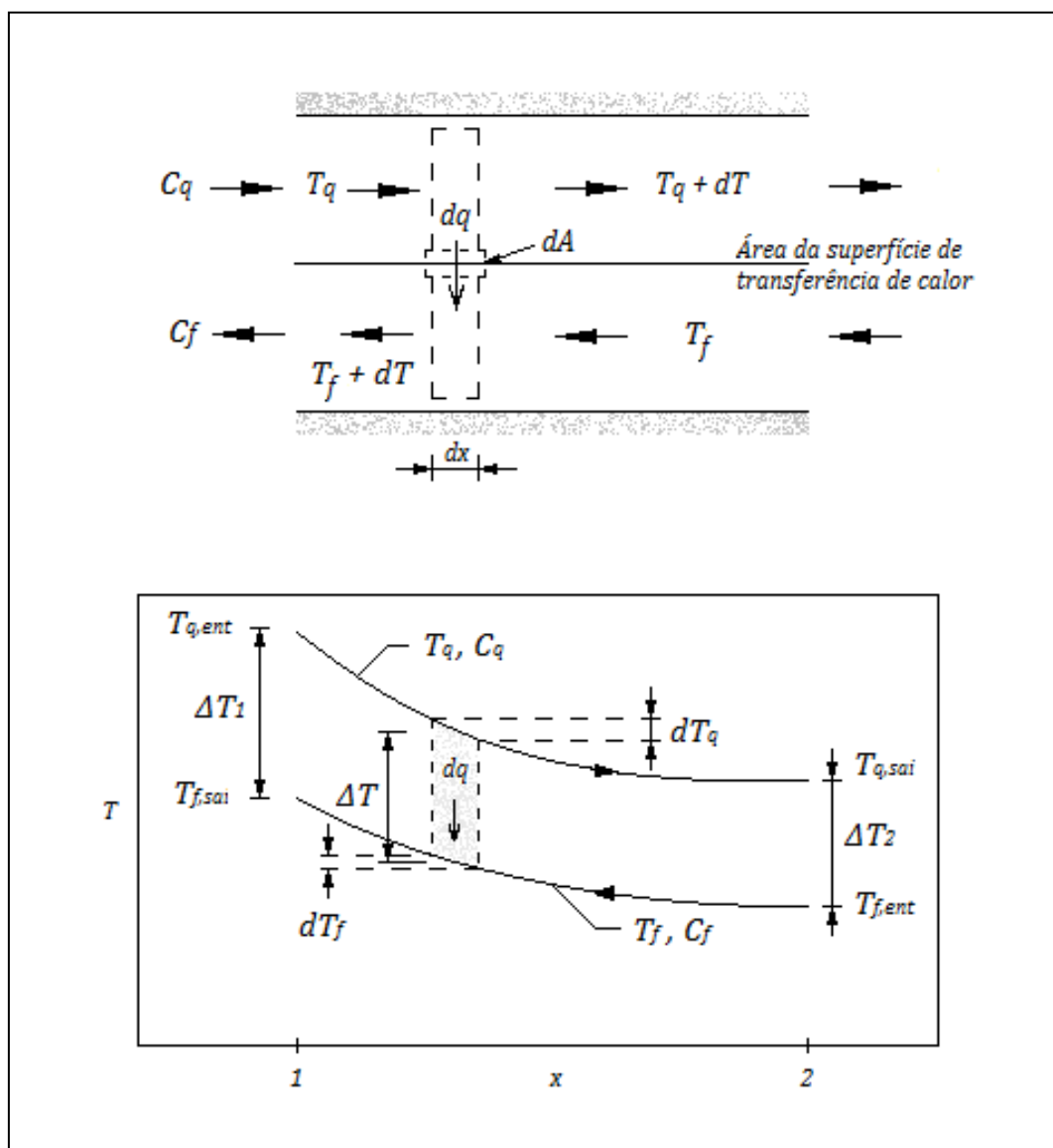


Figura 2.9. Distribuição de temperatura em um trocador de calor com escoamento em contracorrente (Fonte: Incropera et al., 2008 – Adaptado).

2.4.3 O Método da Efetividade-NUT

Em casos onde somente as temperaturas de entrada são conhecidas, é recomendado utilizar o método da efetividade-NUT para a análise da efetividade de trocadores de calor. Para isso, é necessário determinar a taxa de transferência de calor máxima possível, $q_{m\acute{a}x}$.

Em um trocador de calor em contracorrente, um dos fluidos apresenta a máxima diferença possível entre as temperaturas de entrada e saída ($T_{q,ent} - T_{f,sai}$). Considerando a situação, em que a capacidade calorífica do fluido frio é menor do que a do fluido quente ($C_f < C_q$), a diferença entre as temperaturas de entrada e saída do fluido frio será maior que a do fluido quente ($|dT_f| > |dT_q|$).

A *Equação 19* expressa a quantidade máxima de transferência de calor possível entre os fluidos, considerando que a capacidade calorífica mínima $C_{m\acute{i}n}$ equivale à menor entre C_f e C_q .

$$C_f = \dot{m}_f c_{p,f} \quad (17)$$

$$C_q = \dot{m}_q c_{p,q} \quad (18)$$

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (19)$$

Define-se a efetividade (ε) como a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima possível, correspondendo a um número adimensional no intervalo entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Conhecendo os valores das temperaturas de entrada do fluido quente e frio, pode-se determinar a taxa de transferência de calor real.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (20)$$

$$q = \varepsilon C_{m\acute{i}n}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (21)$$

Para qualquer trocador de calor, a efetividade é uma função que depende do número de unidades de transferência (NUT) e da razão $C_{m\acute{i}n}/C_{m\acute{a}x}$.

$$NUT = \frac{UA}{C_{m\acute{i}n}} \quad (22)$$

Quando se trata de um escoamento em contracorrente, a relação efetividade-NUT pode ser expressa pelas seguintes expressões, onde C_r é a razão entre as taxas de capacidades caloríficas mínima e máxima (Incropera et al., 2008).

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1) \quad (23)$$

$$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1) \quad (24)$$

2.5 Queda de Pressão

A queda de pressão em um escoamento tubular acontece em maior parte por conta do fator de atrito, mas também por conta de entradas, acessórios, variações de área e configuração do tubo.

2.5.1 Fator de Atrito

A perda de pressão está relacionada com as perdas causadas pelos efeitos de atrito, em um escoamento completamente desenvolvido em um tubo reto de seção circular constante, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta P_l = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{méd}^2}{2} \quad (25)$$

onde f é o fator de atrito de Darcy (Incropera et al., 2008).

O fator de atrito, o número de Reynolds e o número de Nusselt são baseados no diâmetro hidráulico em escoamentos através de tubos não circulares:

$$D_h = \frac{4A_t}{p} \quad (26)$$

onde A_t é a área da seção transversal do tubo e p é o seu perímetro (Çengel et al., 2012).

Em um escoamento laminar, o fator de atrito é uma função que depende apenas do número de Reynolds, sendo independente da rugosidade. O número de Reynolds varia facilmente com a mudança da velocidade média do escoamento. Em um escoamento laminar no interior de um tubo, o aumento da velocidade do fluido até que se atinja o número de Reynolds crítico provoca a transição para o escoamento turbulento. O gradiente de velocidade na parede do tubo é muito maior em um escoamento turbulento do que em um escoamento laminar. Desta forma, a mudança no perfil de velocidade faz com que a tensão de cisalhamento na parede e o fator de atrito aumente.

Para valores de rugosidade relativa, $e/D \leq 0,001$, o fator de atrito tende a seguir uma curva, a qual corresponde a uma função apenas do número de Reynolds e inversamente proporcional a ele. Entretanto, quando o número de Reynolds aumenta, o efeito da rugosidade relativa também passa a influenciar no fator de atrito. Na transição, f aumenta bruscamente e, no regime turbulento, decresce gradualmente até que se nivela a um valor praticamente constante para um número de Reynolds elevado. Para um número de Reynolds muito grande, o arrasto e a perda de pressão passa a depender somente de e/D , essa situação é chamada de regime de escoamento “completamente rugoso” (Incropera et al., 2008).

2.5.2 Conexões

O escoamento no interior de uma tubulação pode exigir que este percorra uma série de acessórios, curvas ou mudanças de área, as quais resultam em dissipação de energia ocasionando na

queda da pressão. No caso de expansões e contrações súbitas, as perdas de pressão dependem de variáveis geométricas e do escoamento:

$$\Delta P_c = \frac{\rho V_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (27)$$

em que, v_1 e A_1 se referem a velocidade e a área do escoamento antes dos efeitos da alteração da área, e A_2 à área final. A Figura 2.11 ilustra v_1 , A_1 e A_2 em situações de expansão e contração brusca (Fox et. al., 2006).

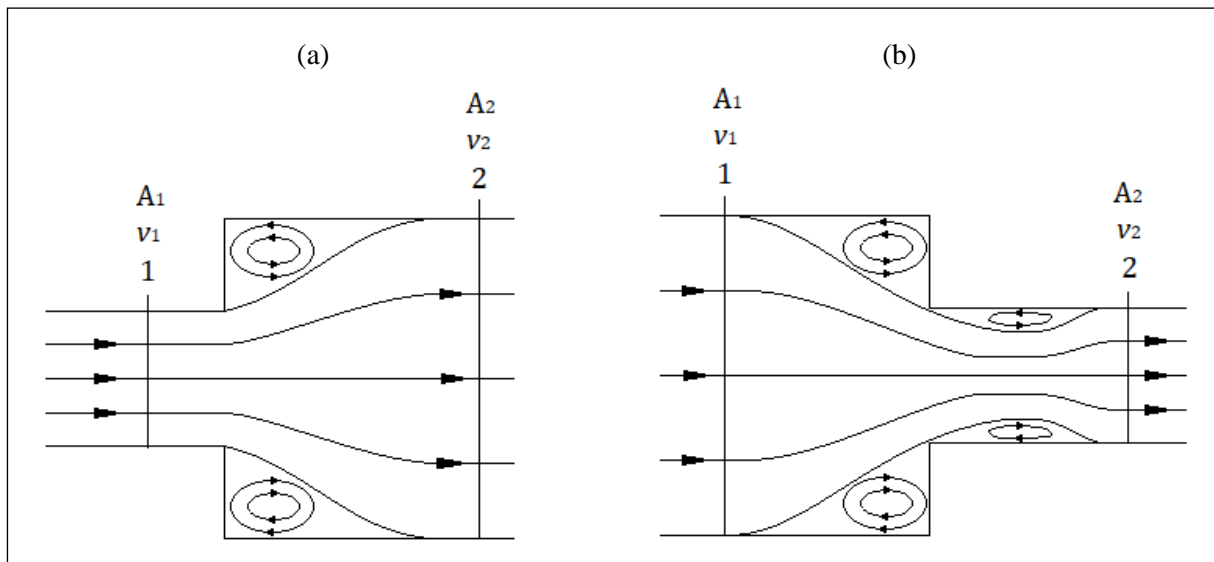


Figura 2.11. Representação do escoamento em casos de (a) expansão brusca e (b) contração brusca.

2.5.3 Tubos Helicoidais

Bobinas tubulares são bastante utilizadas em indústrias como trocadores de calor por conta das suas vantagens de serem compactas e possuírem grande área de transferência de calor. Quando comparadas com trocadores de tubos retos, elas se mostram mais eficientes, apresentando um alto coeficiente de transferência de calor.

Para calcular a queda de pressão em tubos helicoidais, utiliza-se o fator de atrito em tubos circulares ou de Fanning (f_c). Ele depende do número de Reynolds e da geometria do trocador de calor, a qual pode ser descrita pelo número Dean.

$$\text{Dean} = \text{Re} \sqrt{\frac{D}{C}} \quad (28)$$

$$f_c = \frac{\Delta P}{2\rho V^2} \frac{d}{L_c} \quad (29)$$

A taxa de fator de atrito (f_c/f_r), também conhecida como fator da espiral, é a razão entre o gradiente de pressão no tubo circular e o tubo reto com a mesma vazão, ou seja, $(\Delta P/L_c)/(\Delta P_r/L_r)$.

Neste projeto, será considerada a relação para a perda de carga em tubos circulares com escoamento turbulento proposta por Ito em 1959, na qual o número de Dean deve ser maior que 6 (Ali, 2000).

$$f_c \sqrt{\frac{c}{D}} = 0,0791 \left[Re \left(\frac{D}{c} \right)^2 \right]^{-0,2} \quad (30)$$

2.6 CHUVEIROS

A energia elétrica é uma energia nobre, permitindo que ela seja transformada em outras formas de energia sem gerar grandes perdas. Grande parte da energia transformada para a forma de calor ao aquecer a água em chuveiros elétricos é desperdiçada durante o uso.

Comparado com o chuveiro elétrico convencional, o chuveiro com regulador automático de temperatura, o qual será descrito a seguir, apresenta maior compatibilidade com o regenerador quando se busca reduzir os gastos com energia elétrica e água.

2.6.1 Chuveiro Elétrico

O chuveiro elétrico possui uma câmara, na qual a água entra em contato com uma resistência elétrica ligada à rede de energia. O sistema elétrico é acionado com a própria pressão da rede hidráulica, onde a passagem de água pressiona um diafragma, conectando o circuito. Os chuveiros elétricos mais comuns apresentam uma chave de inverno e outra de verão. Elas possuem a função de selecionar duas opções de resistência elétrica, uma que provoca a passagem de uma corrente elétrica maior (chave de inverno) e outra de uma corrente menor (chave de verão). A passagem da corrente está diretamente relacionada com a quantidade de calor transferida para a água por efeito Joule ($P=R \cdot i^2$, em que P é a potência, R a resistência e i a corrente elétrica).

A resistência elétrica é selecionada antes do banho através de um seletor manual e permanece a mesma durante o banho por ser aquecida a uma potência constante. Desta forma, uma quantidade fixa de calor é transferida para a água. Quanto maior a vazão, uma maior quantidade de água passa pela resistência. Assim, neste tipo de chuveiro, a temperatura da água é controlada através da sua vazão, abrindo ou fechando o registro, de modo que o aumento da vazão reduz a temperatura da água do banho e vice-versa (Braga, 2015).

2.6.2 Chuveiro com Regulador Automático de Temperatura

O acionamento do sistema elétrico é feito de forma semelhante ao chuveiro elétrico convencional. Contudo, a temperatura da água que entra na câmara de aquecimento interfere na potência que será aplicada pelo chuveiro para aquecer a água até uma determinada temperatura escolhida para

banho. Se a água chega a uma temperatura mais elevada, menos energia é necessária para fazer com que atinja a temperatura desejada pelo usuário.

O chuveiro com regulador automático de temperatura é controlado com um sistema de realimentação eletrônica (*feedback*), o qual ajusta a potência do chuveiro em função da temperatura de saída da água. Ele corrige a potência progressivamente, dentro de certos limites, de modo que a água de saída do chuveiro atinja a temperatura pré-determinada.

O chuveiro escolhido para este projeto é o da marca Exatron e modelo My Shower. Segundo o manual do fabricante, um dos seus modos de uso permite que o usuário selecione a temperatura da água de saída. O período, que dura desde o acionamento do sistema até que a água atinja a temperatura de banho determinada, varia de acordo com a temperatura da água que abastece o chuveiro.

A ducha contém um sistema automático de realimentação, de maneira que, se a água que sai do chuveiro está a uma temperatura abaixo da selecionada, ela aplica uma potência maior. Se a água está a uma temperatura acima, ela aplica uma potência menor, garantindo uma temperatura constante ao longo de todo o seu funcionamento. Deste modo, permite que o usuário reduza ou aumente a vazão do chuveiro e mesmo assim obtenha a água na temperatura desejada.

Com a combinação dessa tecnologia de chuveiro com o regenerador proposto no trabalho, espera-se que uma potência máxima seja aplicada pelo chuveiro no instante inicial do banho, quando o regenerador ainda não se mostrou eficiente e a água que chega ao chuveiro está mais fria. À medida que ocorre a transferência de calor entre a água aquecida do regenerador e a água de alimentação do chuveiro, é esperado que a potência do chuveiro se reduza gradativamente e que o chuveiro passe a operar com uma menor potência ao atingir as condições de regime permanente no interior do regenerador.

2.7 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A análise econômica deste projeto tem por objetivo verificar a viabilidade econômica do uso do chuveiro com regulador automático de temperatura em conjunto com o regenerador, quando comparado com o uso do chuveiro elétrico convencional sem o regenerador. O método adotado é voltado para projetos de energia e foi o desenvolvido por Carvalho (2005).

A comparação dos custos relacionados nos dois cenários deve ser feita considerando uma mesma potência instalada durante um mesmo tempo de análise, de modo que sejam fornecidas condições equivalentes ao usuário em ambas as situações, isto é, benefícios idênticos.

Além disso, esta análise não leva em conta os custos referentes à substituição de um ralo convencional por um ralo-regenerador e vice-versa. Considera-se que, desde o início do projeto do banheiro, está prevista a instalação de um dos tipos de ralo e que esses valores são similares.

Os custos do projeto podem ser representados de forma concentrada ou uniformemente distribuída através de fluxos de caixa, como ilustrado na Figura 2.12. Essa maneira de abordar os custos se aproxima da realidade, tendo em vista que, apesar de os fluxos financeiros reais serem distribuídos de forma mais complexa, pode-se estimar uma distribuição uniforme equivalente.

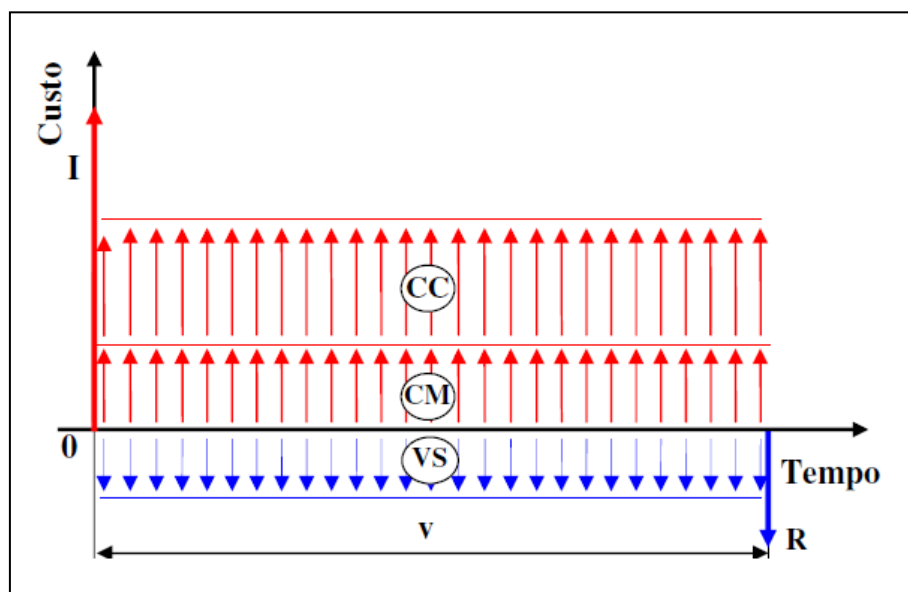


Figura 2.12. Fluxo de caixa de um empreendimento energético, em que, I representa o custo do investimento inicial, CM o custo de manutenção e operação, CC o custo do insumo energético, VS o valor do subproduto, R o valor residual do investimento ao fim da vida útil da instalação e v a vida útil do empreendimento (Fonte: Carvalho, 2005).

Para garantir que ambos os cenários (instalações de chuveiros com ralo) sejam analisados durante um mesmo intervalo de utilização, considera-se um período infinito, realizando um reinvestimento na tecnologia ao término de cada vida útil (Figura 2.13). Desta forma, o Custo Distribuído Total (CD_{TOTAL}) correspondente a uma série infinita com sucessivas reposições.

$$CD_{TOTAL} = CC + CM - VS + I \cdot i + \frac{(I-R) \cdot i}{(1+i)^v - 1} \quad (31)$$

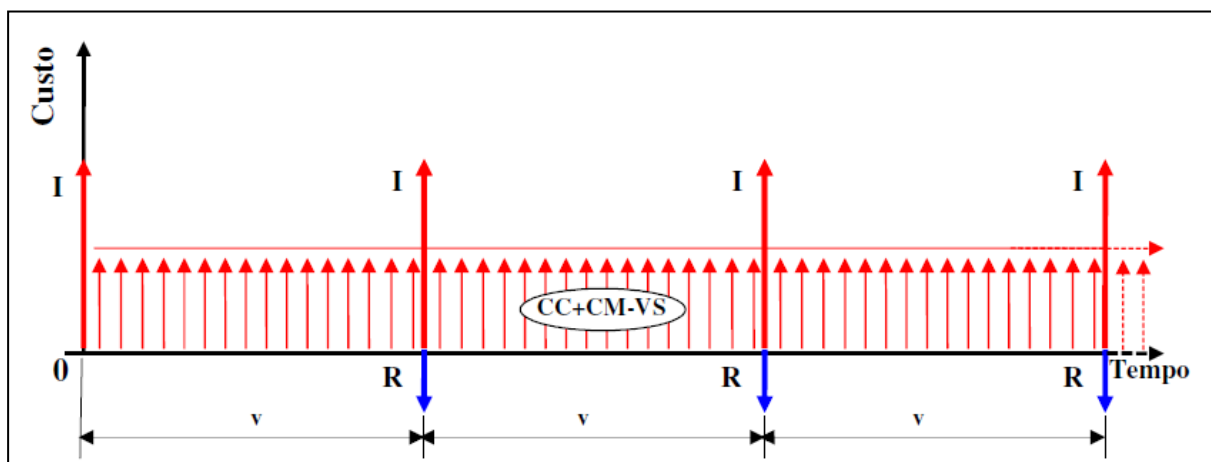


Figura 2.13. Fluxo de caixa de um empreendimento energético com reposição sucessiva ao final da vida útil (Fonte: Carvalho, 2005).

Para o caso em questão, o benefício ou a produção anual de água quente ao longo de um ano (En) pode ser estimada multiplicando a potência instalada (PI em kW) pelo número de horas contidas em um ano – equivalente a 8760 horas – e por um Fator de Capacidade (FC), o qual é definido pela razão entre a energia térmica efetivamente dissipada pelo chuveiro e aquela energia que seria demandada caso a instalação operasse sem regeneração todo o tempo em plena carga, ao longo de um ano.

$$En = PI \cdot FC \cdot 8760 \quad (32)$$

No cenário com regenerador, além do aproveitamento de energia, espera-se que ele reduza o consumo de água em cada banho. O Valor do Subproduto, que corresponde à quantidade de água economizada, é proporcional à energia anual regenerada para um tempo médio de banho e pode ser definido como:

$$VS = VES \cdot PI \cdot FC \cdot 8760 \quad (33)$$

em que, VES é o Valor Específico do Subproduto, que equivale à razão entre o Valor Anual do Subproduto e a Produção Anual de Energia.

O tempo de recuperação do investimento, T , que é o tempo necessário para que os benefícios adquiridos pelo regenerador se igualem ao investimento inicial, considerando uma determinada taxa de juros (i), é expresso por:

$$T = -\frac{\ln\left(1 - \frac{I \cdot i}{B}\right)}{\ln(1+i)} \quad (34)$$

de modo que o Benefício Líquido uniformemente distribuído, B , equivale ao Custo Distribuído Total subtraído do valor da venda da energia regenerada pela Concessionária de Energia Elétrica.

Assim sendo, o valor da energia regenerada pode ser verificado através da análise Custo-Benefício abaixo.

$$C/B = \left(CC + CM - VS + I \cdot i + \frac{(I-R) \cdot i}{(1+i)^v - 1} \right) \cdot \frac{1}{PI \cdot FC \cdot 8760} \quad (35)$$

3 REGENERADOR DE CALOR

3.1 TROCADOR DE CALOR HELICOIDAL DE TUBOS CONCÊNTRICOS

De acordo com as análises realizadas por Neiva (2005) com diferentes tipos de configurações de trocadores de calor, a melhor configuração encontrada para este tipo de aplicação foi a do trocador helicoidal de tubos concêntricos. Este trocador corresponde a um tubo de cobre contínuo enrolado de forma helicoidal ao redor de tubos de PVC concêntricos (Figura 3.1a). Por dentro do tubo de cobre, percorre a água oriunda da rede de abastecimento, que irá abastecer o chuveiro, enquanto que a água proveniente do ralo realiza um percurso de subida e descida pelos anéis de PVC.

Nessa configuração pode-se considerar que o movimento do escoamento seja predominantemente cruzado, com efeitos de contracorrente. De modo que, quando a água desce pelo ralo, a água que irá abastecer o chuveiro sobe por dentro dos tubos de cobre. Esse modelo contém três conjuntos de espirais envoltos em três anéis de PVC concêntricos. Realizando um plano corte (Figura 3.1b), é possível observar na Figura 3.2 que tais movimentos são invertidos em cada anel.

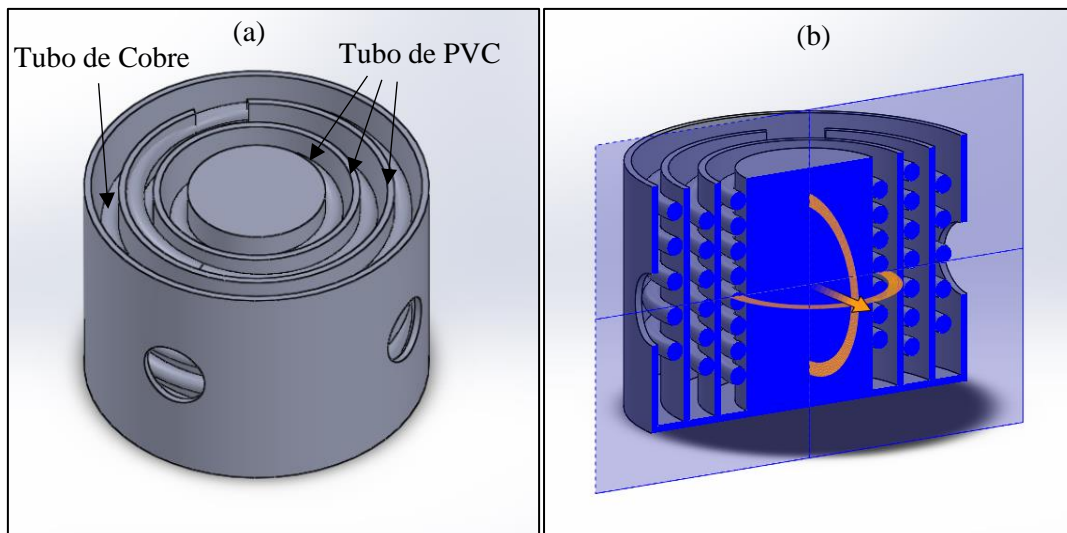


Figura 3.1. (a) Modelagem do ralo-regenerador e (b) plano de corte do ralo-regenerador.

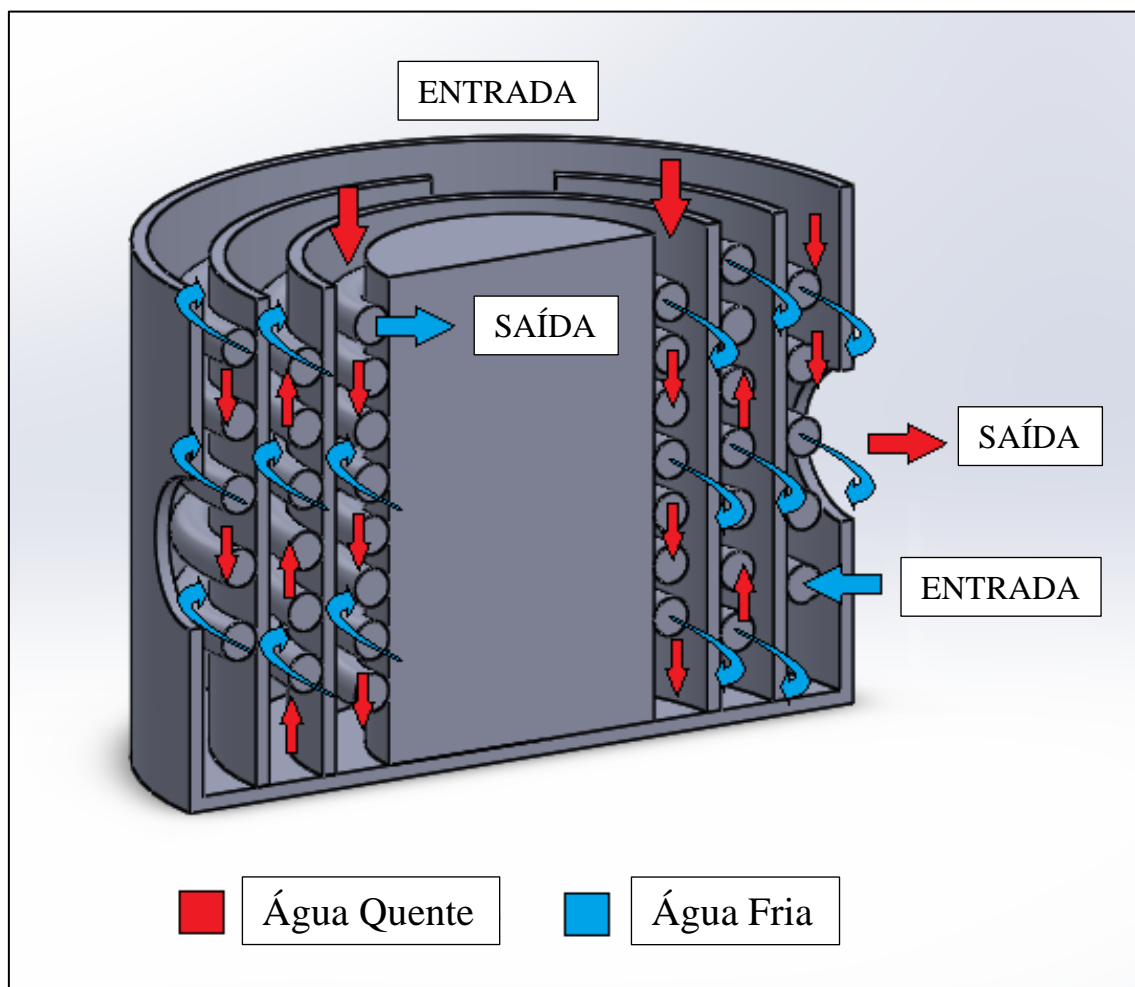


Figura 3.2. Movimentos da água no interior do ralô-regenerador.

3.2 REGIME TRANSIENTE

O chuveiro com regulador automático de temperatura se autorregula para elevar a temperatura da água a um valor constante previamente selecionado. Ao ser ligado, o chuveiro passa a aquecer a água continuamente e demanda um tempo para que ela atinja a temperatura desejada que, uma vez alcançada, é mantida enquanto o chuveiro estiver ligado.

Durante o trajeto da água entre o chuveiro e o ralô, existem perdas de calor de modo que a temperatura da água na entrada do ralô seja ligeiramente menor do que a sua temperatura ao sair do chuveiro. Da mesma forma que a temperatura da água que sai do chuveiro aumenta até atingir a escolhida, a temperatura da água que entra no ralô também aumenta, porém em um patamar inferior devido às perdas de calor.

Existem dois regimes transientes relacionados ao uso do chuveiro com regulador automático de temperatura com o regenerador, um deles está associado com a temperatura da água no interior do regenerador e o outro com a temperatura da água que sai do chuveiro.

O regime transiente relacionado à temperatura no interior do regenerador influencia fortemente a potência consumida pelo chuveiro, enquanto que o regime relacionado à água que sai do chuveiro, além de influenciar a potência consumida por ele, exerce uma influência no intervalo de tempo desde o acionamento do chuveiro até o momento em que a água de saída dele atinge uma temperatura apropriada para dar início ao banho.

O regime transiente no interior do regenerador se inicia no instante em que, após a abertura do registro do chuveiro, ocorre o primeiro contato da água, que entra pelo ralo, com a tubulação de cobre, dando início à transferência de calor para a água fria que escoar em suas espirais. A temperatura neste regime se altera tanto em relação à posição quanto ao tempo, ou seja, pode haver temperaturas diferentes em pontos distintos, assim como no mesmo ponto com o passar do tempo.

O regime transiente se conclui, dando início ao permanente, no instante em que as temperaturas, em cada ponto, permanecem constantes no decorrer do tempo, podendo haver variações conforme a posição. É possível perceber o início deste regime monitorando as temperaturas de entrada e saída de água quente (que entra pelo ralo e sai para a rede de esgoto) e fria (que chega da rede de abastecimento e entra para o chuveiro).

O término do regime transiente associado às temperaturas no interior do regenerador é caracterizado pelo momento em que a temperatura da água que abastece o chuveiro está mais elevada, caso o chuveiro esteja ligado. Essa condição permite que o chuveiro consuma menos energia para aquecer a água que o abastece, exercendo uma influência direta na potência gasta por ele.

No caso do regime transiente associado à temperatura da água que sai do chuveiro, quanto menor for a sua duração, implica que a água que sai do chuveiro atinge mais rapidamente a temperatura de banho selecionada. Isso permite que o banho seja iniciado em um intervalo de tempo mais próximo do acionamento do chuveiro, refletindo em uma redução do desperdício de água.

3.3 CONSTRUÇÃO DO REGENERADOR

3.3.1 Dimensões e Materiais

As características geométricas do ralo-regenerador foram adaptadas às dos materiais encontrados no mercado. Para a sua construção, foram utilizados uma caixa de sifonada, três tubos de PVC posicionados de forma concêntrica entre si e um tubo de cobre conformado em espirais, cujas disposição e dimensões se encontram na Figura 3.3 e Tabela 3.1 respectivamente.

Os espessamentos entre os tubos de PVC foram denominados de anéis e consiste na região percorrida pela água quente no interior do regenerador.

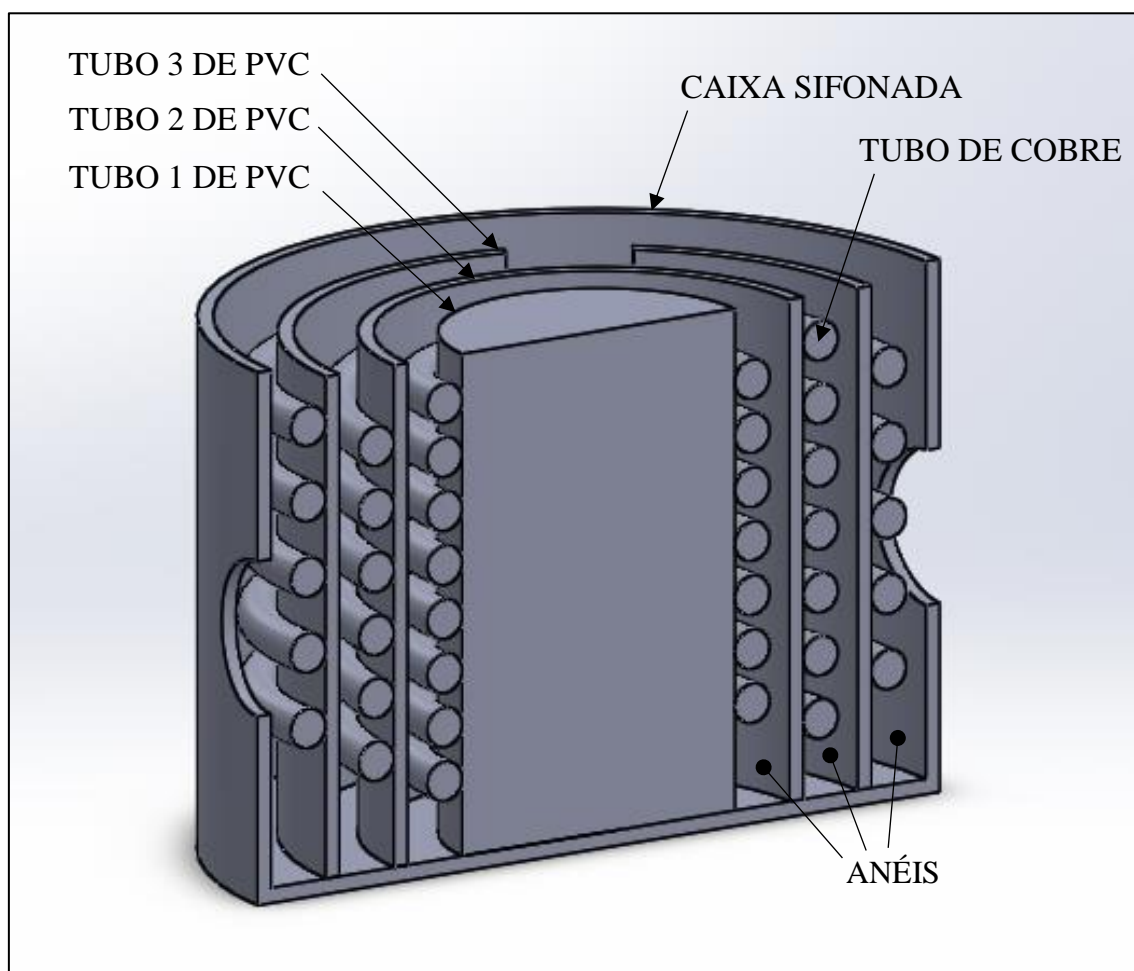


Figura 3.3. Componentes do ralo-regenerador.

| Componente | Diâmetro Interno | Altura | Comprimento | Espessura |
|----------------|------------------|--------|-------------|-----------|
| Caixa Sifonada | 250 mm | 172 mm | - | - |
| Tubo 1 de PVC | 75 mm | - | - | 2 mm |
| Tubo 2 de PVC | 150 mm | - | - | 2 mm |
| Tubo 3 de PVC | 200 mm | - | - | 2 mm |
| Tubo de Cobre | ½ pol | - | 10 m | - |

Tabela 3.1. Dimensões utilizadas para a construção do ralo-regenerador.

3.3.2 Etapas de Construção

O regenerador helicoidal de tubos concêntricos é composto de um tubo de cobre flexível, três tubos de PVC de diferentes diâmetros e uma caixa sifonada, além disso, nas duas extremidades do tubo flexível, foram posicionadas conexões para tubo de cobre a fim de conectar a entrada da água fria na rede de distribuição de água e a saída da água fria na instalação hidráulica que alimenta o chuveiro.

As dimensões do regenerador foram adaptadas às dos materiais disponíveis no mercado. A caixa sifonada escolhida tem uma altura e um diâmetro compatível com as dimensões de um ralo, sua altura é de 172 mm e diâmetro de 250 mm (Figura 3.4).



Figura 3.4. Caixa sifonada de 250 mm x 172 mm.

O tubo de cobre é um bom condutor térmico e resistente à corrosão. O tubo é contínuo com comprimento de 10,7 m e diâmetro de ½ pol e a sua configuração forma três espirais helicoidais concêntricas. O processo de fabricação consistiu em um enrolamento manual e a frio, foram tomadas as devidas precauções para que a tubulação não apresentasse regiões achatadas devido à conformação. Para facilitar este processo, foram utilizadas as curvaturas dos tubos de PVC para moldar as respectivas espirais (Figura 3.5 e 3.6).



Figura 3.5. Processo de fabricação das espirais no tubo de cobre.



Figura 3.6. Espirais do regenerador.

Em seguida, foram realizados dois furos na caixa, um localizado na lateral superior e o outro na lateral inferior para a passagem do cobre.

O tubo de cobre com a conformação helicoidal foi inserido no conjunto dos três tubos de PVC posicionados concentricamente, os quais foram colados com adesivo plástico para PVC ao fundo da caixa sifonada (Figuras 3.7 e 3.8). Utilizando cola vedante compatível com PVC e cobre, as passagens do tubo de cobre pelas paredes da caixa foram vedadas (Figura 3.9).

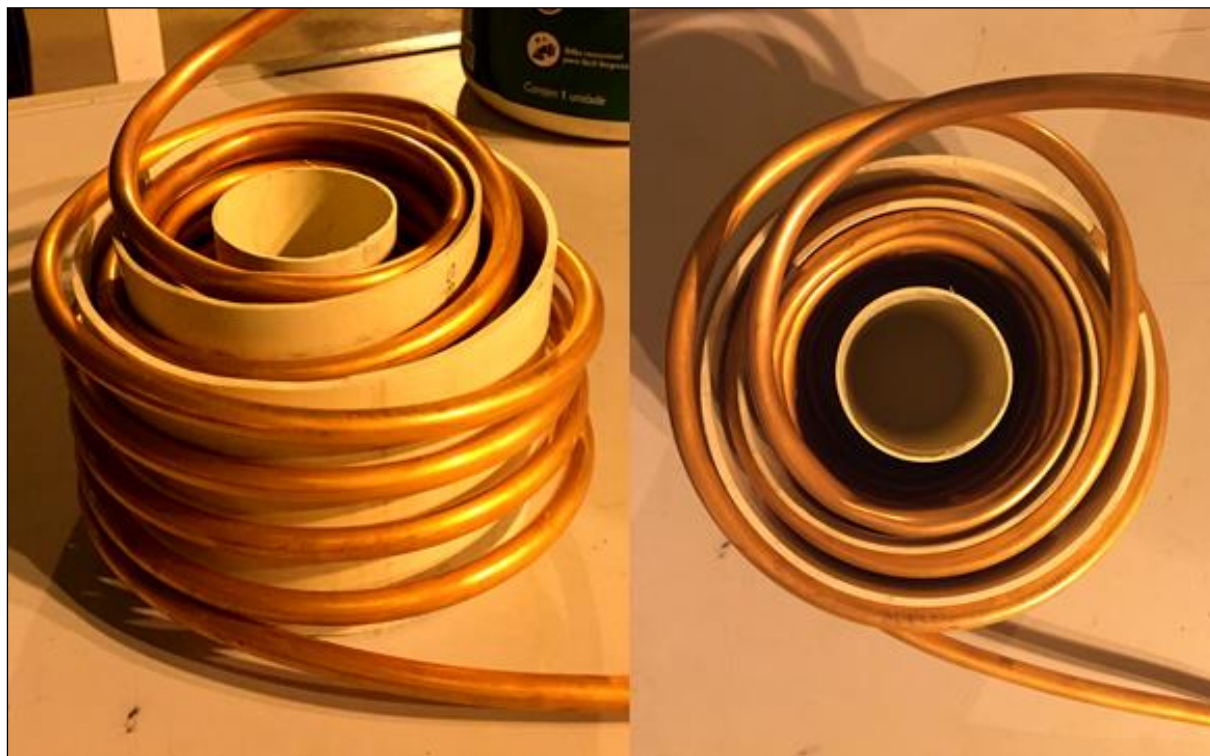


Figura 3.7. Posicionamento dos tubos de PVC nas espirais.



Figura 3.8. Vista superior do regenerador.



Figura 3.9. Vista lateral do regenerador.

Por fim, foram realizados furos na tampa da caixa para permitir a entrada de água quente no anel mais interno do regenerador (Figura 3.10).



Figura 3.10. Tapa do ralo-regenerador.

As conexões das extremidades da tubulação de cobre flexível são de latão, do tipo compressão e indicadas para comportar gases, líquidos e vácuo. Deste modo, a aplicação com água se mostra segura contra vazamentos e danos superficiais.

O conjunto de conexões colocadas em ambas as extremidades foram uma porca de ½ pol, uma anilha de ½ pol e uma união de ½ pol x ½ pol (Figura 3.11).



Figura 3.11. Conexões da tubulação de cobre, da esquerda para a direita: porca de ½ pol, anilha de ½ pol e união de ½ pol x ½ pol.

4 EQUIPAMENTOS E BANCADA EXPERIMENTAL

4.1 EQUIPAMENTOS

Para a análise do desempenho do regenerador em conjunto com um chuveiro com regulador automático de temperatura, foram necessários coletar dados referentes à temperatura, corrente elétrica, vazão e pressão. Por conta disso, na bancada de experimentos, foram instalados um chuveiro, um registro regulador de vazão, um hidrômetro, um manômetro, cinco termopares e um sensor de corrente.

Quando em regime permanente, a corrente alternada se estabiliza e permanece constante. Desta forma, utilizou-se um amperímetro de alicate para a coleta de dados RMS nos experimentos, que buscaram avaliar apenas este regime. Os valores referentes à queda de pressão do regenerador foram obtidos com um manômetro digital sem o uso de qualquer módulo de aquisição, considerando que essa medida foi feita apenas com o fim de verificar a perda de carga do trocador em vazões pré-fixadas.

Nos experimentos em regime transiente, necessitou-se utilizar um sensor de corrente e uma placa específica de aquisição, baseada em Arduino, para se obter dados de corrente RMS em função do tempo. Os valores referentes à vazão e temperatura foram obtidos com o auxílio de um módulo de aquisição de dados, CR1000, que será descrito adiante.

4.1.1 Chuveiro Com Regulador Automático de Temperatura

O chuveiro encontrado que se adequou às especificações necessárias para a aplicação estudada foi o da marca Exatron, de modelo My Shower (CHUD2EBC), Figura 4.1. De acordo com o manual do fabricante (Anexo I), este modelo apresenta uma tensão nominal de 220 VCA, potência nominal de 7,5 kW, frequência nominal de 60 Hz e corrente nominal de 32 A. A pressão mínima de funcionamento é de 0,5 mca. (4,9 kPa) e a sua variação máxima de temperatura é de 35,3°C. Para conectá-lo na rede elétrica, foi necessária a utilização de uma fiação com área de seção transversal mínima de 6mm². O modelo My Shower contém dois modos de funcionamento: o modo temperatura e o modo potência.

Com o modo temperatura selecionado, a ducha realiza um ajuste automático da temperatura. Conforme apresentado na Seção 2.6.2, o usuário seleciona a temperatura desejada do banho, através de um controle remoto que interage com o *software* do chuveiro. A ducha identifica a temperatura selecionada e aplica a potência necessária para mantê-la constante no valor escolhido. Vale ressaltar que a ducha não mantém a temperatura da água que sai do chuveiro exatamente na temperatura selecionada, ela se mantém em valores próximos da selecionada.

Não é preciso alterar a vazão para que seja feito o ajuste da temperatura, contudo, como o chuveiro possui um limite de potência, pode ser necessária uma redução da vazão para que a água atinja

a temperatura requerida. Este modo opera com um sistema de realimentação eletrônica que ajusta a potência de acordo com a temperatura de saída da água.

Ativando o modo potência, a ducha passa a funcionar como um chuveiro elétrico convencional, cujo funcionamento foi apresentado no item 2.6.1. Este modo não realiza o ajuste automático do consumo de energia e permite que dez tipos de potências sejam selecionados através do controle remoto. O ajuste da temperatura, se necessário, é realizado com a alteração da vazão de água feita manualmente pelo registro.



Figura 4.1. Ducha sensorial My Shower fabricada por Exatron.

(Fonte: <https://www.tecmundo.com.br/curiosidade/104650-myshower-conheca-primeira-ducha-sensorial-brasil.htm>)

4.1.2 Hidrômetro

A medição da vazão foi feita através do uso de um hidrômetro da marca Saga, de modelo US-3,0 e classe B (Figura 4.2). Ele emite sinais em pulsos equivalentes a 1 pulso/litro, os quais foram registrados com o uso do módulo de controle de dados CR1000.

Este equipamento apresenta uma resolução no seu visor analógico de 0,002 l. O hidrômetro US-3,0 opera a uma temperatura máxima de 40°C, uma pressão máxima de 1MPa e uma vazão entre 0,3 m³/h e 3 m³/h, conforme as especificações técnicas do fabricante (Anexo II).



Figura 4.4. Sonda feita de sensores de temperaturas LM35 impermeabilizados.

4.1.4 Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado é do tipo não invasivo de modelo SCT-013-03 do fabricante YHDC, cuja faixa de temperatura de operação do sensor é de -25°C a 70°C e margem de erro de $0,03^{\circ}\text{C}$ (Figuras 4.5 e 4.6). Ele atua como um transformador de corrente, sendo capaz de operar com correntes alternadas na faixa de 0 a 100A e convertê-las para uma faixa de 0 a 50 mA, segundo especificações do fabricante em Anexo IV.

A coleta dos valores RMS da corrente foi feita utilizando digitalmente uma placa Arduino, sendo necessária a realização de um circuito auxiliar para divisão de tensão, melhor detalhado adiante na Seção 4.1.7.



Figura 4.5. Sensor de corrente não invasivo SCT-013-000.

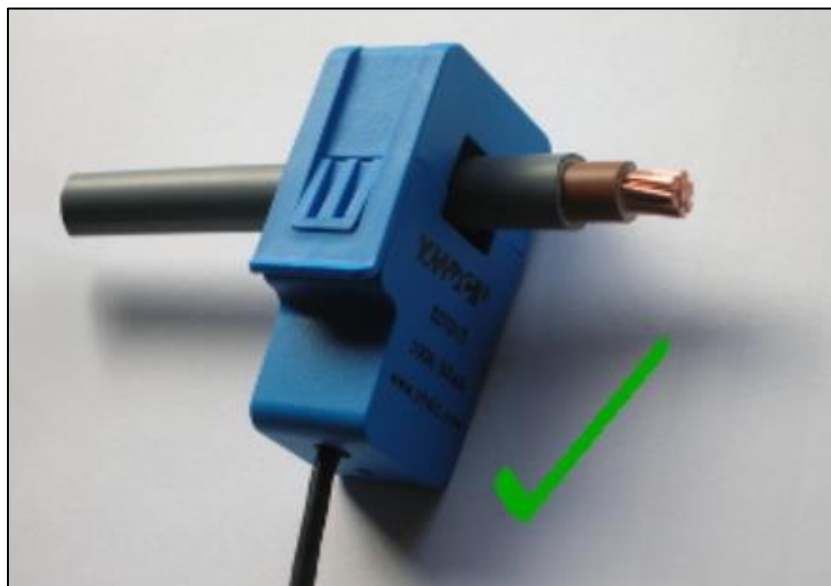


Figura 4.6. Sensor de corrente não invasivo SCT-013-000
(Fonte: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/installation>).

4.1.5 Manômetro

O manômetro digital (Figura 4.7) utilizado é da marca Zürich e modelo Z.10.B, cuja faixa de operação é 0 a 100 mca e precisão de 0,01 mca (Anexo V). A leitura da pressão não necessita de qualquer placa de aquisição e foi utilizado para aferir a perda de carga do regenerador para as vazões de água de 3, 4, 5 e 6 l/min.



Figura 4.7. Manômetro Zürich modelo Z.10.B 3A.

4.1.6 Módulo de Aquisição de Dados

Os dados de temperatura e vazão foram coletados e armazenados por uma placa de medição e controle da marca Campbell Scientific e do modelo CR1000 (Figura 4.8). O módulo de controle e medição é capaz de coletar as medições dos sensores, processar os dados, os armazenar em seu próprio programa e controlar dispositivos externos. O seu sistema operacional permite programar a medição, o processamento dos dados e o armazenamento.

Esse equipamento é compatível com a medição de pontes, pulsos (frequência), termopares, tensões, os quais são processados, em um determinado intervalo de tempo preestabelecido, com a utilização da linguagem de programação CRBasic.

Segundo as especificações técnicas do fabricante (Anexo VI), o módulo CR1000 é alimentado por uma faixa de 9,6 V a 16 V e apresenta um limite de entrada de ± 5 V. Contém dois contadores de pulso, a faixa de temperatura coletadas pode variar no intervalo de -55°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e a precisão varia de acordo com o intervalo medido.

O CR1000 possibilita a coleta dos pulsos do hidrômetro e as diferenças de potenciais dos sensores de temperatura, os quais são processados e convertidos em vazão e temperatura.

Como o módulo CR1000 não possibilitava a aquisição de dados de corrente alternada (RMS), fez-se necessária a utilização de um a placa ARDUINO programável para avaliar numericamente o valor RMS da corrente medida pelo Sensor de corrente SCT-013-000.



Figura 4.8. Módulo CR 1000 da marca Campbell Scientific (Fonte: <https://www.campbellsci.es/cr1000>)

4.1.7 Placa Arduino Programada Para Calcular a Corrente RMS

Para obter os dados de corrente RMS, foi utilizada a plataforma Arduino, a qual é composta de dois elementos principais: a placa Arduino e um *software* IDE², utilizado para interface e criação de códigos, que são executados após serem introduzidos na placa.

A conexão do sensor de corrente à plataforma foi feita por sua entrada analógica, sendo alimentado por uma tensão de 5V. A leitura das tensões verificadas pelo sensor não pode ser feita diretamente, portanto houve a necessidade de construir e conectar um circuito de divisão de tensão à placa de Arduino (Figura 4.9) e utilizar uma biblioteca de conversão para os valores RMS de corrente, os quais foram calibrados utilizando um multímetro de alicate.

O circuito é composto de três resistores e um capacitor e foi instalado na *protoboard* de acordo com o Anexo VII. Os sinais coletados pela placa foram transformados para a corrente RMS utilizando o esboço da biblioteca EmonLib.cpp retirada do sítio da Open Energy Monitor, um projeto de código aberto para o desenvolvimento de ferramentas para monitorar energia. Associado ao código, foi inserido um comando contador de tempo para efetuar os registros relativos aos horários em que cada dado foi coletado.

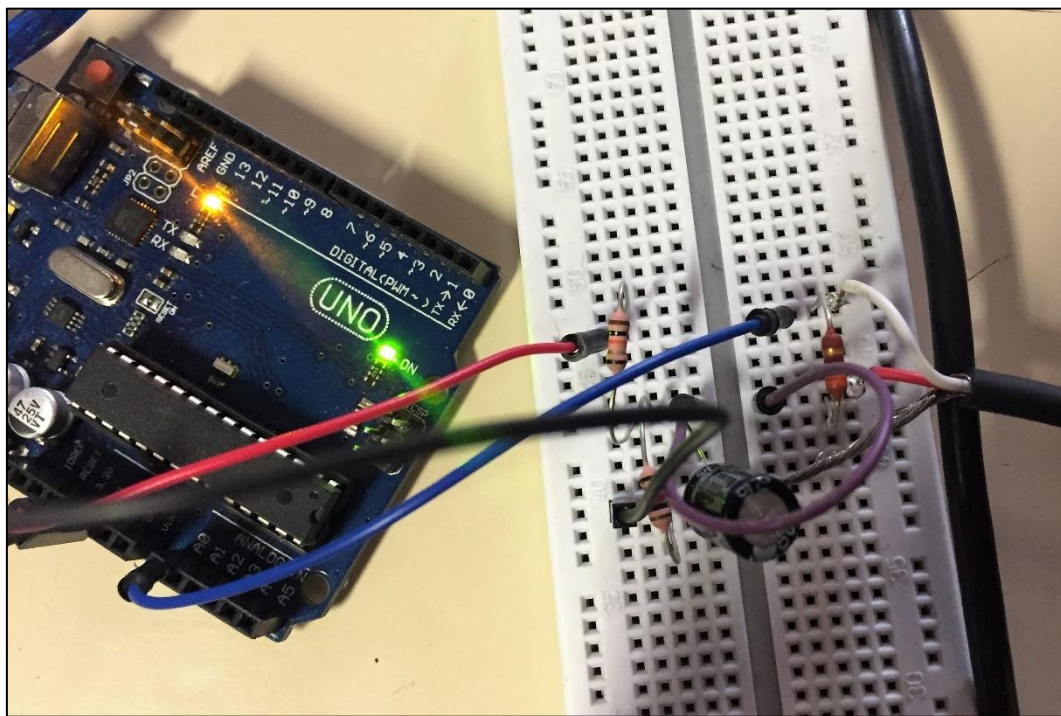


Figura 4.9 – Placa Arduino e circuito utilizado.

² Integrated Development Environment: programa executado no computador que permite escrever códigos na linguagem Processing, o qual é traduzido para a linguagem C e convertido para um compilador avr-gcc, permitindo a leitura pelo microcontrolador.

4.2 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada de experimentos busca simular um *box* para banheiro, conforme a ilustração apresentada na Figura 4.10.

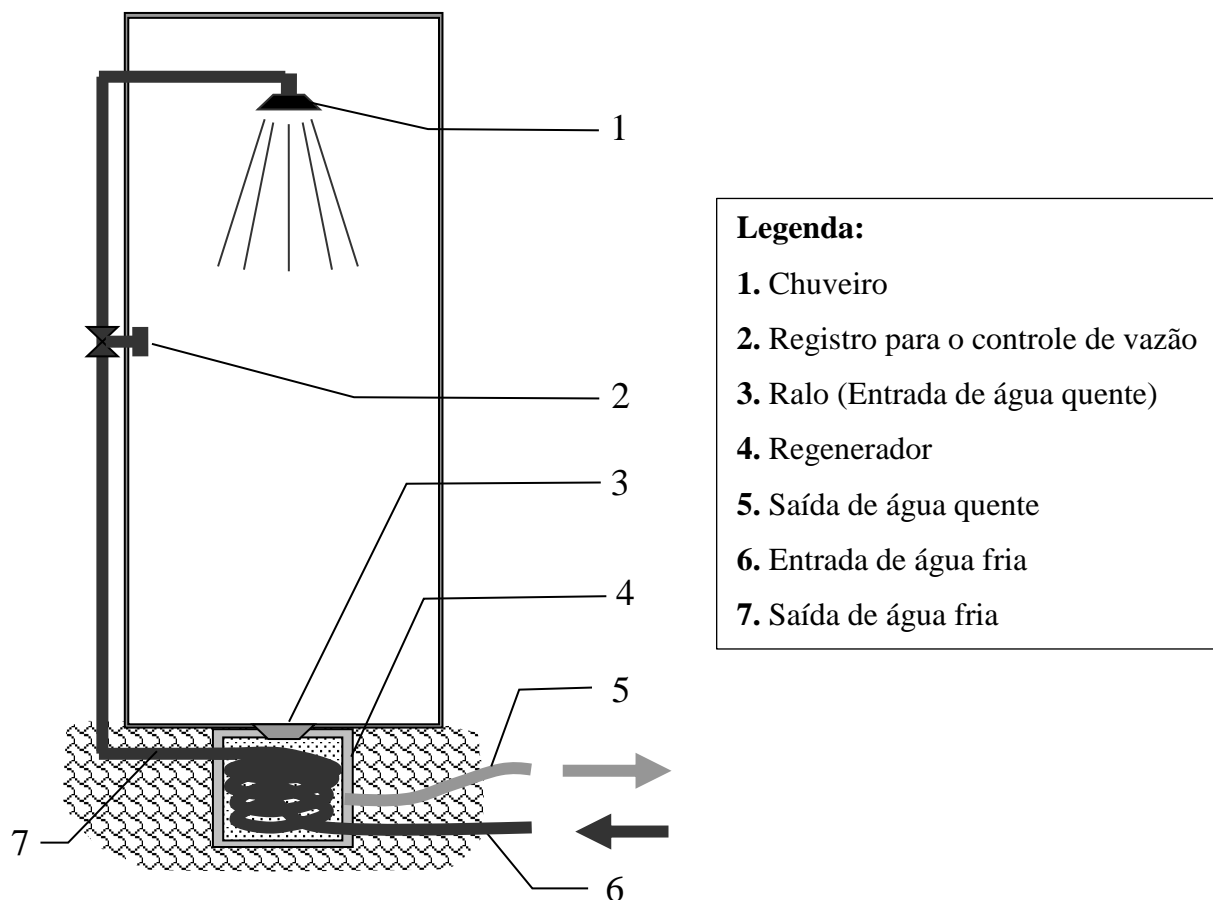


Figura 4.10. Ilustração da bancada experimental (Autor: Mário Olavo Magno de Carvalho).

Ela foi construída com placas de compensado de madeira sustentadas por hastes de aço (Figura 4.11). A base do box, onde foi instalado o ralo, é quadrada de lados de 0,7 m e a altura que vai da entrada do ralo até o chuveiro é de 1,8 m. Ela tem o formato de um paralelepípedo, o qual foi totalmente impermeabilizado e é responsável pela coleta e direcionamento da água do chuveiro para o regenerador através de um ralo posicionado em seu centro. O vão inferior ao piso do box é destinado para abrigar o regenerador.



Figura 4.11. Bancada experimental construída.

Para a obtenção de dados, foram instalados cinco sensores de temperatura em cinco pontos distintos: entrada e saída de água quente e de água fria e saída do chuveiro (Figura 4.12).

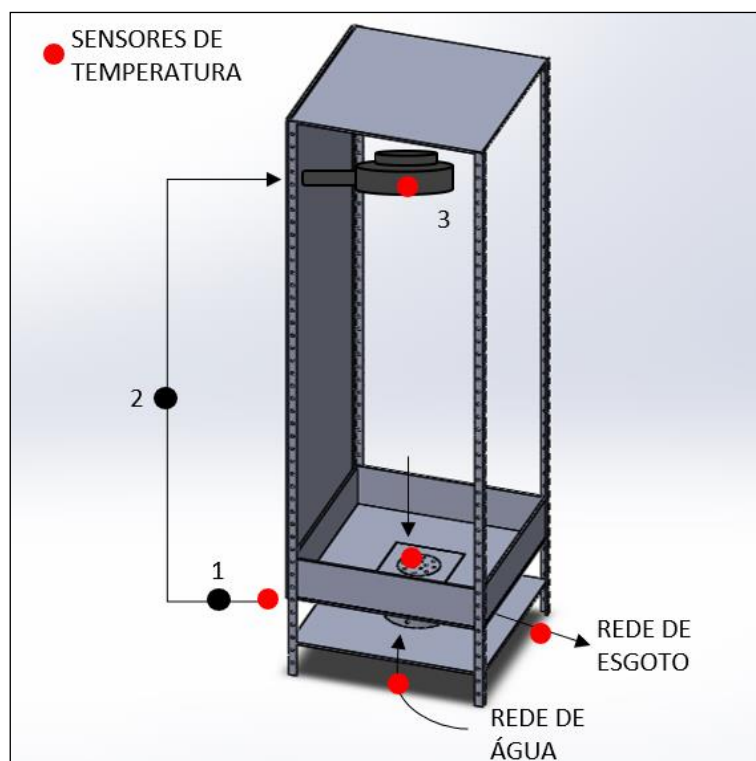


Figura 4.12. Esquema representativo da bancada experimental. Os números indicam os dispositivos instalados: (1) hidrômetro, (2) registro do tipo gaveta de controle de fluxo de água e (3) chuveiro. As setas correspondem ao caminho percorrido pela água.

O percurso da água durante os experimentos com o regenerador ocorreram da seguinte forma. Em uma das extremidades da tubulação de cobre, o regenerador foi abastecido diretamente pela água da rede hidráulica através de uma mangueira (Figura 4.12, seta “rede de água”). Após percorrer todo o trajeto de cobre no interior do regenerador, a água passou pelo hidrômetro, seguindo para uma tubulação de PVC conectada a um registro do tipo gaveta, utilizado para o controle da vazão da água que abastece o chuveiro. Após ser aquecida e sair pelo chuveiro, ela alcançou a tampa do ralo-regenerador por um trajeto em queda livre.

A água quente captada pela tampa foi direcionada para o anel mais interno do regenerador. A água quente transitou entre os anéis de PVC, onde entrou em contato com a superfície externa das espiras de cobre, por onde se passava a água fria proveniente da rede de abastecimento, e promoveu a transferência de calor. Por fim, a água quente foi guiada até a saída do regenerador conectada à rede de esgoto (Figura 4.12, seta “rede de esgoto”).

Nos experimentos sem o uso do regenerador, a água após ser aquecida e sair pelo chuveiro foi direcionada para a rede de esgoto antes de alcançar a entrada de água quente do ralo-regenerador. Nesses experimentos, a água da rede de abastecimento percorreu o interior da tubulação de cobre sem alterar a sua temperatura antes de abastecer o chuveiro.

Em ensaios cujo único fim foi determinar a perda de carga no regenerador, foi instalado o manômetro em duas conexões do tipo T posicionadas em cada extremidade da tubulação de cobre, através do qual foram mensuradas a diferença de pressão do regenerador referentes a diferentes vazões. Os equipamentos instalados na bancada podem ser observados na Figura 4.13.

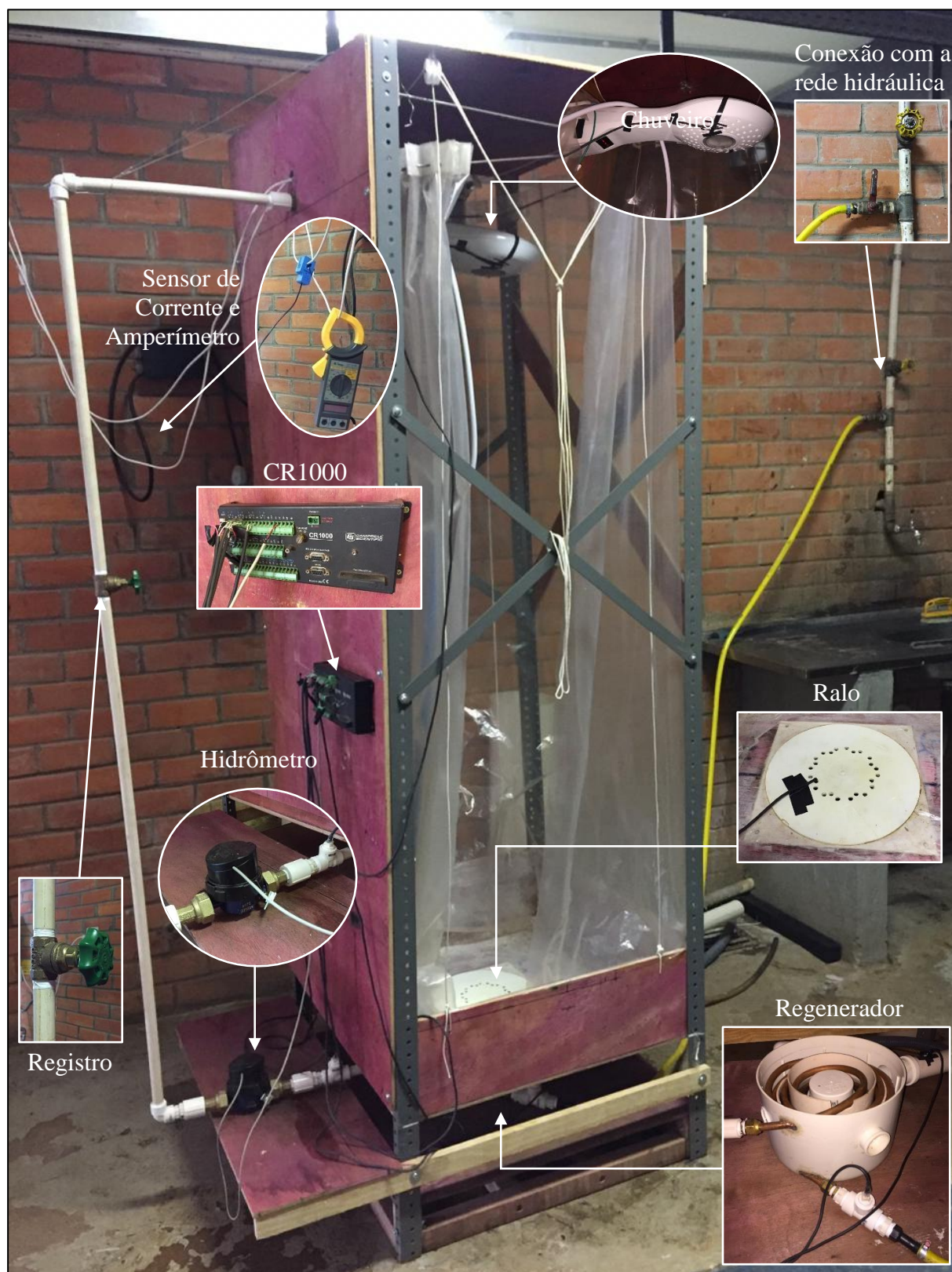


Figura 4.13. Equipamentos instalados na bancada experimental.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

O chuveiro utilizado dispõe de dois modos de operação: o modo potência e o modo temperatura. O modo potência se equipara ao funcionamento dos chuveiros convencionais, no qual a potência consumida permanece a mesma durante todo uso. O modo temperatura permite que se fixe a temperatura de banho e o chuveiro ajusta automaticamente a sua potência para aquecer a água e atender a temperatura selecionada. A potência consumida depende de alguns elementos como a vazão de água, a temperatura da água que o abastece e a temperatura do banho.

O experimento foi realizado em duas etapas, visando comparar os desempenhos em regimes permanente e transiente do chuveiro em modo potência sem o regenerador e em modo temperatura com o regenerador e a perda de carga do regenerador. As análises foram baseadas nos dados coletados da corrente consumida pelo chuveiro, temperaturas em cinco pontos, vazão e pressão da água.

A etapa de ensaios em regime permanente teve como objetivo avaliar o rendimento do regenerador variando as condições de vazão e de diferença entre as temperaturas da água de banho e da rede de abastecimento. O rendimento verificado corresponde à razão entre a potência consumida pelo chuveiro em modo temperatura com o ralo-regenerador e pelo chuveiro em modo potência sem o ralo-regenerador, guardadas as mesmas condições de vazão e temperaturas da água de entrada da rede e do banho. Na etapa de ensaios em regime transiente, buscou-se avaliar a duração do período que se inicia no acionamento do chuveiro e se finaliza quando a temperatura da água que sai do chuveiro atinge uma temperatura próxima da escolhida para o banho.

Desta forma, se com o uso do regenerador esse intervalo se reduz, ou seja, o chuveiro gasta menos tempo para aquecer a água na temperatura selecionada para o banho, pode-se verificar que existe um volume de água desperdiçado sem o uso do regenerador, considerando que o início do banho ocorre quando a água atinge uma temperatura próxima da desejada.

As etapas do experimento em regime permanente e transiente são compostas de nove ensaios e cada ensaio é composto de dois cenários diferentes de banhos de duração de 10 minutos cada, um com o chuveiro no modo potência e sem o regenerador e outro com o chuveiro no modo temperatura e com o regenerador, de maneira que sejam garantidas condições aproximadas de vazão e temperatura da água da rede de abastecimento e do banho. A Tabela 5.1 a seguir representa as etapas compostas no experimento.

| Etapas do Experimento | Ensaio | Condição Simulada | Parâmetros Fixados | Obter |
|----------------------------|--------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Etapa 1: Regime Permanente | 1 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P1}, \text{vazão}_{P1}$ | Rendimento_{P1} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P1}, \text{vazão}_{P1}$ | |
| | 2 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P2}, \text{vazão}_{P2}$ | Rendimento_{P2} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P2}, \text{vazão}_{P2}$ | |
| | 3 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P3}, \text{vazão}_{P3}$ | Rendimento_{P3} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P3}, \text{vazão}_{P3}$ | |
| | 4 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P4}, \text{vazão}_{P4}$ | Rendimento_{P4} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P4}, \text{vazão}_{P4}$ | |
| | 5 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P5}, \text{vazão}_{P5}$ | Rendimento_{P5} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P5}, \text{vazão}_{P5}$ | |
| | 6 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P6}, \text{vazão}_{P6}$ | Rendimento_{P6} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P7}, \text{vazão}_{P7}$ | |
| | 7 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P7}, \text{vazão}_{P7}$ | Rendimento_{P7} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P7}, \text{vazão}_{P7}$ | |
| | 8 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P8}, \text{vazão}_{P8}$ | Rendimento_{P8} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P8}, \text{vazão}_{P8}$ | |
| | 9 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P9}, \text{vazão}_{P9}$ | Rendimento_{P9} |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},P9}, \text{vazão}_{P9}$ | |

| | | | | |
|-----------------------------------|----------|------------------------------------|--|----------------------------------|
| Etapa 2: Regime Transiente | 1 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T1}, \text{vazão}_{T1}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},1}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T1}, \text{vazão}_{T1}$ | |
| | 2 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T2}, \text{vazão}_{T2}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},2}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T2}, \text{vazão}_{T2}$ | |
| | 3 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T3}, \text{vazão}_{T3}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},3}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T3}, \text{vazão}_{T3}$ | |
| | 4 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T4}, \text{vazão}_{T4}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},4}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T4}, \text{vazão}_{T4}$ | |
| | 5 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T5}, \text{vazão}_{T5}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},5}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T5}, \text{vazão}_{T5}$ | |
| | 6 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T6}, \text{vazão}_{T6}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},6}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T7}, \text{vazão}_{T7}$ | |
| | 7 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T7}, \text{vazão}_{T7}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},7}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T7}, \text{vazão}_{T7}$ | |
| | 8 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T8}, \text{vazão}_{T8}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},8}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T8}, \text{vazão}_{T8}$ | |
| | 9 | Modo Potência Sem o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T9}, \text{vazão}_{T9}$ | $\Delta T_{\text{TRANSIENTE},9}$ |
| | | Modo Temperatura Com o Regenerador | $T_{\text{BANHO},T9}, \text{vazão}_{T9}$ | |

Tabela 5.1. Procedimento experimental.

5.2 ETAPA 1: REGIME PERMANENTE

Foram realizados nove ensaios em regime permanente utilizando o chuveiro nos modos potência e temperatura, dentro dos quais se buscou manter a vazão da água e a temperatura de banho com valores aproximados. Em cada ensaio, o experimento em modo potência ocorreu antes do experimento em modo temperatura. Isso permitiu um melhor ajuste das temperaturas de banho, tendo em vista a praticidade de selecionar a temperatura do banho em modo temperatura em função da temperatura de banho atingida anteriormente no modo potência.

No início de cada experimento no modo potência, foi ajustada a vazão do chuveiro com a potência P0 selecionada, cuja corrente de alimentação do chuveiro equivale a 0A, e aguardado até que as temperaturas de cada sensor se mantivessem constantes. Em seguida, foi alterada a potência do chuveiro e aguardado o tempo necessário para que o sistema entrasse em regime permanente e que, a partir de então, se iniciassem as coletas de dados.

Nos experimentos em modo temperatura, o ajuste da vazão foi feito de forma semelhante aos experimentos em modo potência e, em seguida, foi aguardado até que as temperaturas de cada sensor se mantivessem constantes. Posteriormente, alterou-se o chuveiro para o modo temperatura e selecionou-se a temperatura de banho atingida no experimento anterior em modo potência. Foi aguardado o estabelecimento do regime permanente para dar início às medições.

Nesta etapa, foram coletados os dados da corrente consumida pelo chuveiro, da vazão da água e das temperaturas da água em cinco pontos: entrada da água fria no regenerador/rede de abastecimento, saída da água fria no regenerador, saída do chuveiro, entrada de água quente no regenerador e saída de água quente do regenerador.

A partir dos valores obtidos das temperaturas em cada sensor durante o intervalo de medição do Ensaio 9, foram confeccionados os Gráficos 1 e 2. Os gráficos referentes aos demais ensaios da Etapa 1 em regime permanente se encontram no Apêndice I.

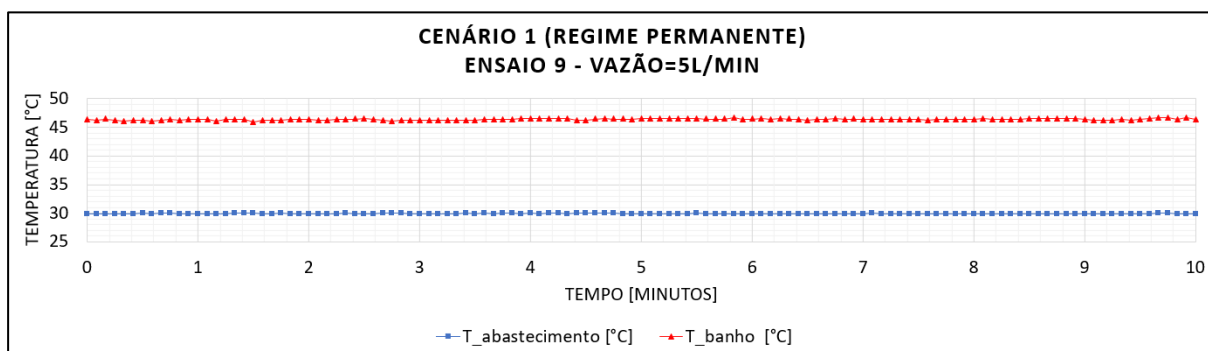


Gráfico 1. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 9 (Cenário 1) em regime permanente.

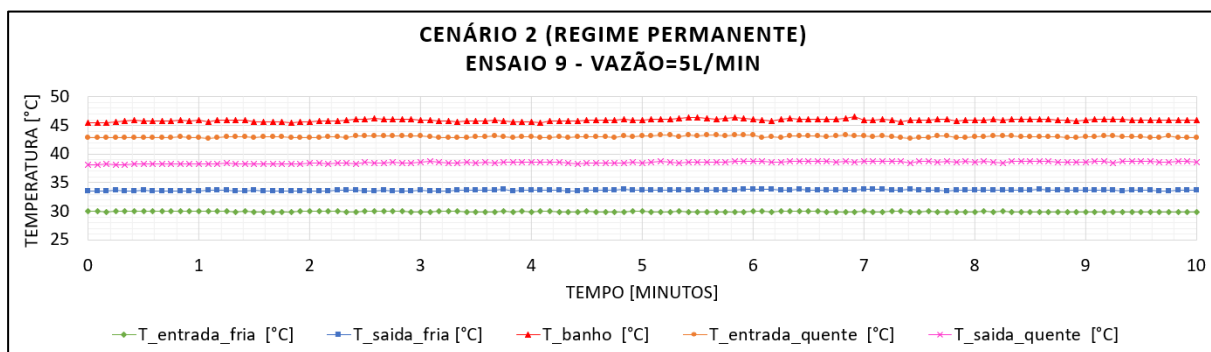


Gráfico 2. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 9 (Cenário 2) em regime permanente.

Os gráficos referentes aos experimentos em modo potência foram plotados apenas com os valores adquiridos da temperatura da água da rede de abastecimento e do banho, tendo em vista que, em modo potência, se pretende simular condições de um banho sem o regenerador. Nesses casos, a água proveniente do chuveiro foi direcionada diretamente para a rede de esgoto, sem permitir que ela entrasse no regenerador.

Durante os experimentos, foram constatadas pequenas oscilações na vazão de água da rede de abastecimento, as quais contribuíram para a não linearidade dos gráficos, e variações na temperatura da água da rede no intervalo entre os experimentos, as quais impossibilitaram que os ensaios fossem realizados de maneira mais precisa em mesmas condições.

Na Tabela 5.2, encontram-se a diferença de temperatura entre a água da rede de abastecimento e da água do banho, a vazão, a potência consumida nos experimentos realizados em cada cenário e o rendimento do regenerador verificado em cada ensaio.

| | Cenário | ΔT [°C] | Vazão [l/min] | Potência permanente [W] | Rendimento |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|---------------|
| Ensaio 1 | Modo Potência Sem Regenerador | 6,2 | 4 | 3498 | 11,9 % |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 7,7 | | 3080 | |
| Ensaio 2 | Modo Potência Sem Regenerador | 10,1 | 5 | 4664 | 17,5 % |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 10,8 | | 3850 | |
| Ensaio 3 | Modo Potência Sem Regenerador | 8,7 | 6 | 4510 | 14,6 % |

| | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------|------|---|------|---------------|
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 9,6 | | 3850 | |
| Ensaio 4 | Modo Potência Sem Regenerador | 11,3 | | 4180 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 11,1 | 4 | 3322 | 20,5 |
| Ensaio 5 | Modo Potência Sem Regenerador | 13,4 | | 5478 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 15,0 | 5 | 4070 | 25,7 % |
| Ensaio 6 | Modo Potência Sem Regenerador | 13,6 | | 6490 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 12,7 | 6 | 4598 | 29,2 % |
| Ensaio 7 | Modo Potência Sem Regenerador | 20,3 | | 5500 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 20,4 | 3 | 3960 | 28,0 % |
| Ensaio 8 | Modo Potência Sem Regenerador | 19,2 | | 6402 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 19,2 | 4 | 4620 | 28,5 |
| Ensaio 9 | Modo Potência Sem Regenerador | 16,3 | | 6600 | |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 16,0 | 5 | 4686 | 29,0 |

Tabela 5.2. Resultados obtidos nos ensaios realizados em regime permanente.

É possível verificar uma relação crescente entre o rendimento do regenerador e a diferença de temperatura da água do banho e da rede de distribuição. De maneira que o rendimento aumenta quando a diferença de temperatura aumenta. Essa relação também é observada entre a vazão e rendimento.

Sendo assim, o rendimento depende tanto da diferença de temperatura (que altera a eficiência do regenerador), quanto da vazão da água (que altera o desempenho do trocador de calor).

Com relação aos experimentos realizados com a mesma vazão, observou-se um aumento do rendimento apenas com o aumento da diferença de temperatura da água, como pode ser visto no Gráfico 3, nos ensaios 1, 4 e 8 realizados com vazão de 4 l/min, nos ensaios 2, 5 e 9 com vazão de 5 l/min e nos ensaios 3 e 6 com vazão de 6 l/min.

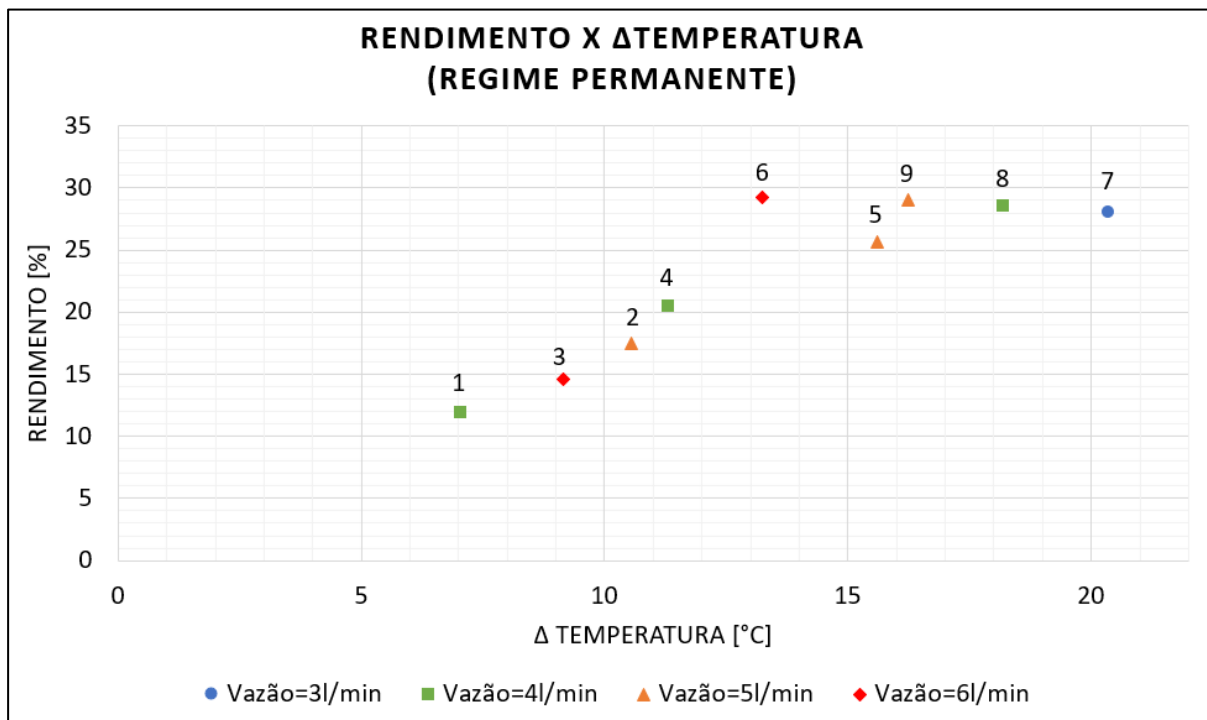


Gráfico 3. Relação entre o rendimento do regenerador e as variáveis vazão e diferença de temperatura da água em regime permanente.

Os dados experimentais foram coletados no mês de setembro de 2018 na cidade de Brasília, DF, uma época do ano em que a média da temperatura da água da rede de distribuição encontrada foi de 30°C. A diferença entre a temperatura da água do banho e a da rede de distribuição nesta época é inferior quando no primeiro semestre do ano, em que a temperatura da rede de distribuição pode atingir 20°C, conforme os experimentos realizados por Neiva (2005). Além disso, os banhos em períodos mais frios tendem a ser tomados com uma temperatura superior com relação à temperatura selecionada no verão, contribuindo para o aumento dessa diferença. Desta forma, o rendimento do regenerador durante o inverno ou em regiões mais frias que Brasília tende a ser maior que os rendimentos obtidos no experimento realizado.

5.2.1 PERDA DE CARGA

Neste projeto, analisar a perda de carga é importante para determinar se há a necessidade de utilizar soluções apropriadas para situações nas quais a pressão da água junto ao chuveiro é insuficiente

para obter um fluxo de água adequado. Tais soluções podem estar relacionadas à altura da caixa da água com relação ao chuveiro ou com a necessidade de utilização de uma bomba de água, por vezes encontrada já embarcada no próprio chuveiro.

A queda de pressão está relacionada às perdas por atrito ocasionadas pelas conexões, mudanças de área da seção transversal e configuração helicoidal da tubulação de cobre no caso do regenerador estudado, conforme foi apresentado na Seção 2.5.

Foram feitas medições de pressão na entrada e saída do regenerador utilizando um manômetro digital. Os valores médios obtidos encontram-se na Tabela 5.3.

| Vazão [l/min] | Pressão na Entrada do Regenerador [mca] | Pressão na Saída do Regenerador [mca] | ΔP [mca] |
|------------------|--|--|---------------------|
| 3 | 4,68 | 3,33 | 1,35 $\pm 0,02$ |
| 4 | 6,80 | 4,67 | 2,13 $\pm 0,02$ |
| 5 | 9,74 | 6,35 | 3,39 $\pm 0,02$ |
| 6 | 12,3 | 8,76 | 3,57 $\pm 0,02$ |

Tabela 5.3. Valores obtidos de pressão no interior da tubulação de cobre na entrada e saída do regenerador para diferentes vazões.

Ao vencer as perdas de carga, o escoamento converte parte da energia mecânica em energia térmica, dissipando calor. Desta forma, mesmo que seja associada ao sistema uma bomba d'água, a parte da energia elétrica adicionalmente consumida será utilizada para aquecer a água que abastece o chuveiro.

5.3 ETAPA 2: REGIME TRANSIENTE

Na segunda etapa de experimento, foram realizados nove ensaios em regime transiente utilizando o chuveiro nos modos potência e temperatura. Foram coletados os dados da corrente consumida pelo chuveiro, da vazão da água e da temperatura da água em cinco pontos: entrada da água fria no regenerador/rede de abastecimento, saída da água fria no regenerador, saída do chuveiro, entrada de água quente no regenerador e saída de água quente do regenerador.

Os experimentos realizados se iniciaram com o ajuste da vazão de água utilizando a potência P0, cuja corrente de alimentação do chuveiro é de 0A. Dentro de cada ensaio, foi realizado primeiro o experimento em modo potência e em seguida em modo temperatura. As medições realizadas no modo potência foram feitas durante um intervalo de 10 minutos a partir do instante em que a potência do

chuveiro foi alterada para aquela que garantisse uma temperatura de banho conforme a desejada em cada experimento. Desta forma, foi possível observar as variações da temperatura em cada posição com o passar do tempo.

Os experimentos em modo temperatura se iniciaram com a pré-seleção (em modo temperatura) da temperatura de banho atingida no experimento anterior em modo potência. Desta forma, após realizar o ajuste da vazão e o equilíbrio térmico no interior do regenerador com a potência P0 selecionada, ao retornar o chuveiro para o modo temperatura e dar início à coleta de dados, ele atinge automaticamente o valor pré-selecionado, sem que haja a necessidade de fazer qualquer ajuste.

A partir dos valores de temperatura e corrente obtidos em cada sensor durante o intervalo de medição do Ensaio 6, foram confeccionados os Gráficos 4 a 7. Os gráficos referentes aos demais ensaios da Etapa 2 em regime transiente se encontram no Apêndice II.

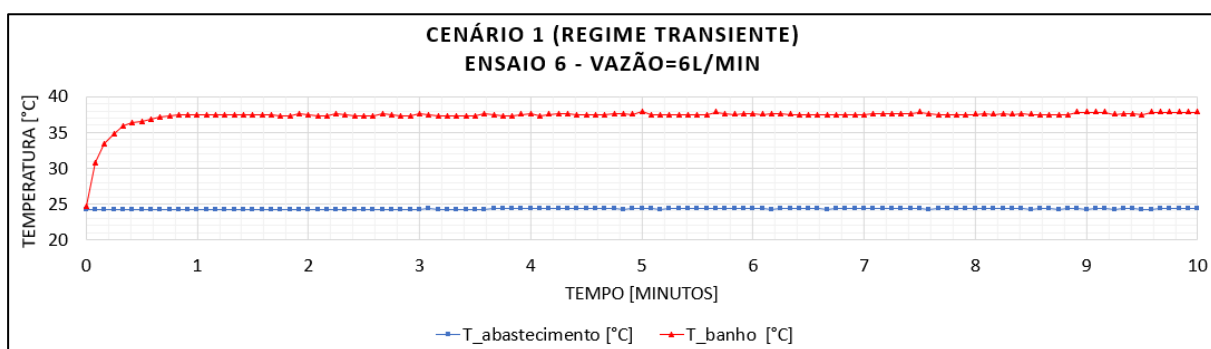


Gráfico 4. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 6 (Cenário 1) em regime transiente.

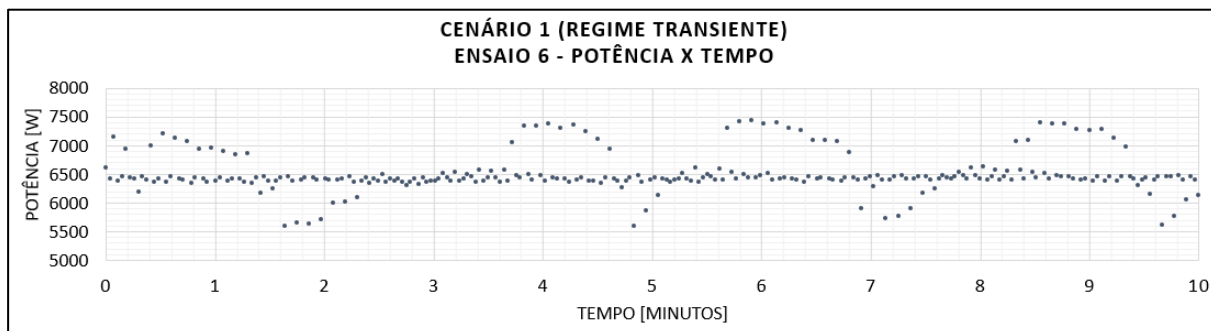


Gráfico 5. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 6 (Cenário 1) em regime transiente.

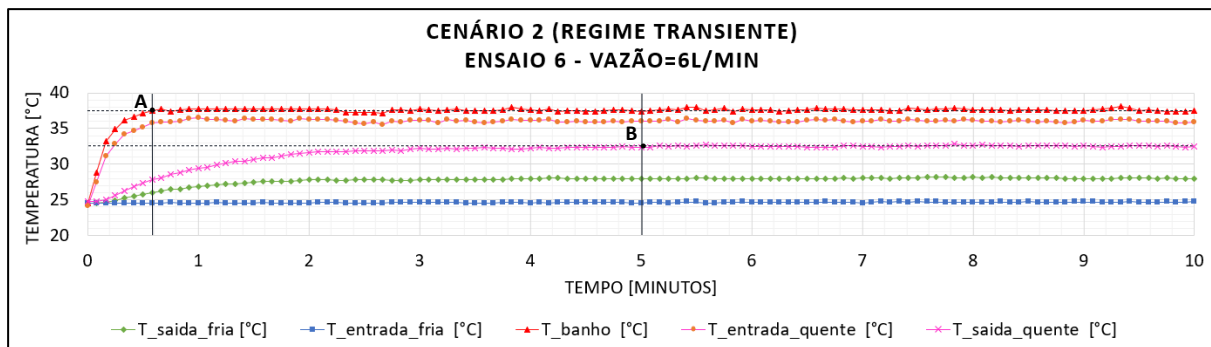


Gráfico 6. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 6 (Cenário 2) em regime transiente.

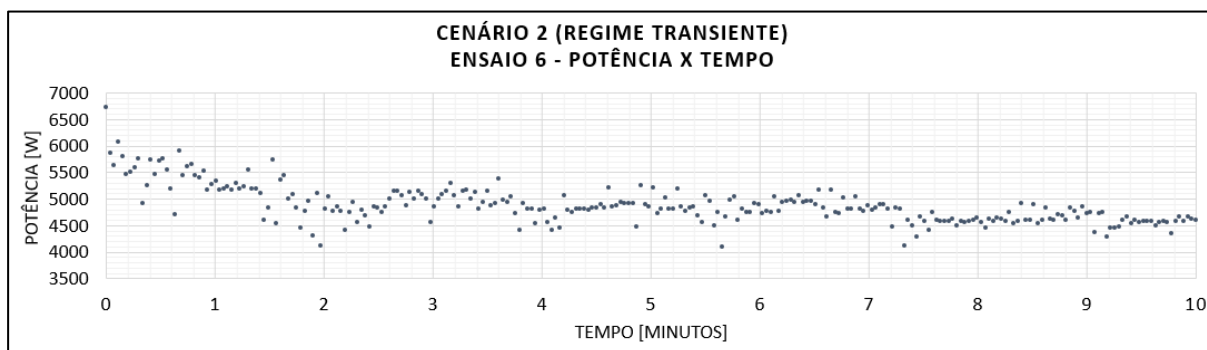


Gráfico 7. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 6 (Cenário 2) em regime transiente.

Foram observadas oscilações nos dados de corrente, cuja origem não foi identificada. O ideal seria a utilização de uma placa que verifica diretamente a corrente RMS, evitando a presença de ruídos. Com auxílio de um amperímetro de alicate, foi observado que essas oscilações não se referem às oscilações da rede elétrica, mas do próprio sistema de avaliação numérica do valor RMS na medição do Arduino, como pode ser visto no Gráfico 8 comparativo. Apesar de os dados obtidos pelo sensor de corrente conterem variações, foi constatada uma sequência de pontos que formam uma continuidade nos gráficos correspondente à corrente que alimenta o chuveiro, cujos valores são compatíveis com os obtidos pelo amperímetro de alicate.

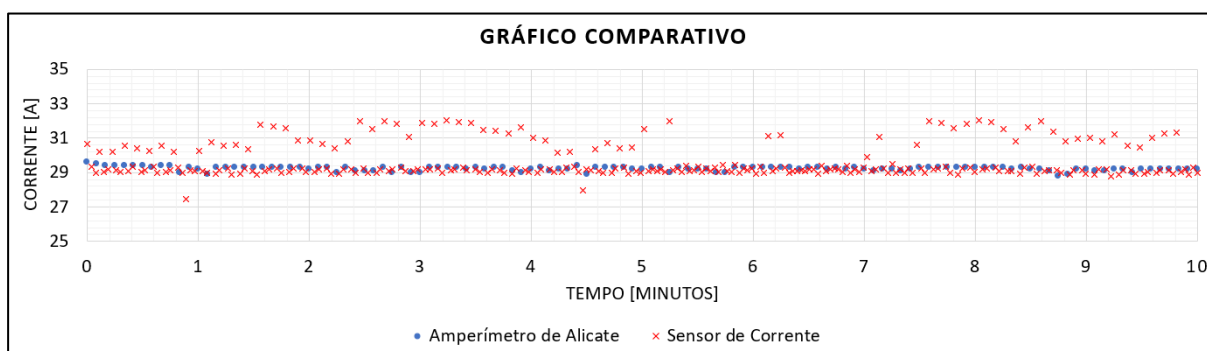


Gráfico 8. Dados de corrente obtidos ao mesmo tempo pelo amperímetro de alicate e pelo sensor de corrente SCT-013-000.

Por não haver a possibilidade de controlar a temperatura da água rede de abastecimento, os experimentos ficaram suscetíveis às pequenas variações da temperatura da água de rede hidráulica. Levando em consideração que os experimentos foram realizados em uma época do ano, em que a temperatura da água da rede se encontra elevada, as curvas de temperatura sofreram uma variação inferior que a esperada em dias mais frios.

No Gráfico 6, observou-se que o tempo que leva para que a temperatura da água que sai do chuveiro se mantenha constante (instante relativo ao ponto A) é diferente do tempo que a potência consumida pelo chuveiro leva para se estabilizar (instante relativo ao ponto B). Constata-se pelo gráfico que há dois períodos transientes, um referente à temperatura da água que sai do chuveiro e outro à potência consumida por ele. Verifica-se ainda que a potência consumida pelo chuveiro se estabiliza junto com a temperatura da água aquecida pelo ralo que chega ao chuveiro. É possível observar o

momento em que isso acontece quando as temperaturas em cada ponto do regenerador passam a ser constantes ao longo do tempo, o qual é verificado através da curva da temperatura da água de saída quente.

Conforme apresentado na Seção 3.2, o intervalo que se inicia com o acionamento do sistema e termina quando a temperatura da água que sai do chuveiro se estabiliza, corresponde ao período transiente da temperatura de banho. Este foi utilizado para verificar a quantidade de água que se desperdiça quando se utiliza o modo potência sem o regenerador, simulando um chuveiro elétrico e ralo convencionais. Considerando que o banho somente se inicia quando a temperatura da água que sai do chuveiro atinge um valor próximo ao desejado, o início do banho pode ser realizado de forma mais rápida, evitando o desperdício de uma parcela de água, com a redução do período transiente utilizando o modo temperatura com o regenerador.

Foi observado nos gráficos de corrente no modo temperatura, que a corrente atinge um valor máximo no início do banho e se reduz na medida em que a temperatura da água se aproxima da temperatura selecionada. Mesmo quando a temperatura da água que sai do chuveiro atinge a temperatura desejada e se mantém constante, as sucessivas trocas de calor no interior do regenerador fazem com que em cada ponto a temperatura da água continue variando. Como no caso da saída de água fria do regenerador, onde a temperatura neste ponto continua a se elevar, fazendo com que a água que abastece o chuveiro passe a chegar a uma temperatura crescente no decorrer de um período de tempo. A consequência disso se reflete no consumo de energia consumida pelo chuveiro, visto que a água que o abastece tem a temperatura aumentada e, por essa razão, o chuveiro necessita de uma menor quantidade de energia para aquecê-la até a temperatura selecionada para o banho.

Os dois períodos transientes apresentam durações diferentes, sendo o relacionado à temperatura de banho mais breve que o relacionado à corrente. O término do período transiente da corrente é compatível com o momento em que as temperaturas em todos os pontos do regenerador se estabilizam.

Para comparar o intervalo do regime transiente relacionado à temperatura de banho entre os experimentos de um mesmo ensaio, adotou-se que este equivale ao tempo necessário para elevar a temperatura da água que sai do chuveiro até 98% da sua temperatura ao se estabilizar. Essa condição foi determinada considerando o cenário de que o banho é iniciado quando a água atinge até 1°C a menos da temperatura desejada.

Por conta da dificuldade encontrada para garantir condições iguais entre os experimentos de modo potência e temperatura e com a finalidade de reduzir os erros ao compará-los, adotou-se um Fator de Correção que corresponde à razão entre a diferença de temperatura obtida no experimento em modo potência e a obtida em modo temperatura. Este fator é aplicado no intervalo do regime transiente encontrado em modo temperatura.

Na Tabela 5.4, estão apresentados os resultados obtidos, referentes aos dois cenários analisados, de diferença entre as temperaturas da água oferecida pela rede de abastecimento e da água do banho, a vazão, a potência consumida pelo chuveiro no período transiente da corrente, a variação dos períodos transientes relacionados à corrente e à temperatura e a quantidade de água economizada ao utilizar o regenerador em conjunto com o modo temperatura do chuveiro.

| Cenário | | ΔT [°C] | Vazão [l/min] | Potência transiente [kW] | Δt trans,corrente [min] | Δt trans,temperatura [s] | Economia De água [l] |
|----------|-------------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|
| Ensaio 1 | Modo Potência Sem Regenerador | 8,7 | | 3,53 ±0,03 | | 24,2 | |
| | | | 4 | | 4,9 | | 0,1 |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 9,5 | | 3,32 ±0,01 | | 22,3 | |
| | | | | | | | |
| Ensaio 2 | Modo Potência Sem Regenerador | 13,4 | | 5,48 ±0,04 | | 29,7 | |
| | | | 5 | | 5,8 | | 0,3 |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 14,1 | | 4,91 ±0,02 | | 26,6 | |
| | | | | | | | |

| | | | | |
|-----------------|-------------------------------------|------|------------|------|
| Ensaio 3 | Modo Temperatura Com Regenerador | 8,4 | 3,95 ±0,05 | 17,1 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 7,4 | 4,02 ±0,06 | 19,7 |
| | | 6 | 3,1 | 0,3 |
| Ensaio 4 | Modo Temperatura Com Regenerador | 14,3 | 4,19 ±0,03 | 28,1 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 14,6 | 4,65 ±0,01 | 37,0 |
| | | 4 | 5,6 | 0,6 |
| Ensaio 5 | Modo Temperatura Com Regenerador | 14,1 | 5,50 ±0,07 | 21,5 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 14,6 | 6,53 ±0,03 | 31,1 |
| | | 5 | 5,3 | 0,8 |

| | | | | |
|-----------------|-------------------------------------|------|-----------------|------|
| Ensaio 6 | Modo Temperatura Com Regenerador | 12,9 | 5,04 \pm 0,06 | 28,2 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 13,2 | 6,43 \pm 0,03 | 34,8 |
| | | | | |
| Ensaio 7 | Modo Temperatura Com Regenerador | 18,6 | 4,77 \pm 0,04 | 25,0 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 18,7 | 5,35 \pm 0,06 | 28,7 |
| | | | | |
| Ensaio 8 | Modo Temperatura Com Regenerador | 19,2 | 4,86 \pm 0,03 | 22,1 |
| | Modo Potência Sem Regenerador | 18,4 | 5,38 \pm 0,05 | 36,0 |

| | | | | |
|-----------------|-------------------------------------|------|------------|------|
| Ensaio 9 | Modo Potência Sem Regenerador | 16,1 | 6,90 ±0,05 | 33,1 |
| | | 5 | 6,0 | 0,7 |
| | Modo Temperatura Com Regenerador | 17,0 | 6,21 ±0,06 | 24,7 |
| | | | | |

Tabela 5.4. Resultados obtidos nos ensaios realizados em regime transiente.

A partir da análise dos dados, observou-se uma relação entre a quantidade de água economizada no período transiente com a vazão e a diferença entre as temperaturas da água da rede de abastecimento e a do banho. De forma que se obtém uma economia tão maior, quanto maiores forem a diferença entre as temperaturas e a vazão. Para melhor visualização dessa relação, foi confeccionada a Tabela 5.5.

| Vazão [l/min] | ΔT [°C] | Economia de Água [l] |
|----------------------|----------------|-----------------------------|
| 3 | 18,7 | 0,3 |
| 4 | 9,1 | 0,1 |
| 4 | 14,5 | 0,6 |
| 4 | 18,8 | 0,9 |
| 5 | 13,8 | 0,3 |
| 5 | 14,4 | 0,8 |
| 5 | 17,6 | 0,7 |
| 6 | 7,9 | 0,3 |
| 6 | 13,1 | 0,7 |

Tabela 5.5. Resultados obtidos de economia de água de acordo com a vazão e variação de temperatura.

Para uma mesma vazão, observa-se um crescimento da quantidade economizada de água quando a diferença de temperatura aumenta. Da mesma forma, que a economia aumenta com o aumento da vazão considerando uma variação aproximada de temperatura. Essa relação é um indicativo de que em regiões ou épocas do ano mais frias, tende-se a esperar resultados mais favoráveis com uso do regenerador em conjunto com o chuveiro com regulador automático de temperatura.

5.4 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Esta etapa do projeto se propõe verificar se o uso do chuveiro com regulador automático de temperatura e com o regenerador é viável economicamente com relação ao uso do chuveiro elétrico convencional sem o regenerador. A metodologia utilizada foi a desenvolvida por Carvalho (2005) e apresentada na Seção 2.7.

Para comparar os dois cenários, é necessário que eles forneçam benefícios equivalentes, no caso em questão, as mesmas condições de banho relacionadas à temperatura e vazão da água. Considera-se ainda que, nos dois cenários, a instalação dos equipamentos seja feita junto com o banheiro, desconsiderando os custos referentes à substituição de um conjunto de equipamentos por outro.

Dessa forma, foram feitas duas análises distintas dos gastos ao longo da vida útil de ambos os cenários estudados. Para tanto, foram considerados os resultados obtidos no Ensaio 6 da Seção 5.3, visto que o rendimento em regime permanente nessas condições (de aproximadamente 28,7%), mais se aproximam das condições esperadas para regiões e/ou períodos mais frios do ano.

A avaliação econômica do Cenário 1 se refere à utilização do chuveiro convencional sem o regenerador, a avaliação do Cenário 2 está relacionada à utilização do chuveiro com regulador automático de temperatura com o regenerador.

O investimento inicial considerado para o Cenário 1 corresponde aos custos da compra de um ralo e chuveiro convencional. No Cenário 2, os valores incluem os gastos com a compra do chuveiro com regulador automático de temperatura e do ralo-regenerador construído (com a aquisição da tubulação de cobre e da caixa de PVC utilizadas na fabricação). Foram desconsideradas as despesas com os anéis de PVC e conexões, no último caso, tendo em vista que o valor total gasto superaria o valor que seria cobrado do consumidor em uma fabricação em larga escala. Em ambos os cenários, foi considerado que a vida útil das instalações é de 20 anos.

Com relação aos custos devidos à manutenção anual, adotou-se um valor nulo gasto no Cenário 1 e um valor de 30 reais no Cenário 2, tendo em vista a maior complexidade do sistema. Neste custo está inclusa a remoção de resíduos que possam se acumular nas superfícies internas do regenerador a fim de garantir uma melhor eficiência e evitar entupimentos.

Ao término da vida útil das instalações, no Cenário 1, considerou-se um valor residual nulo, tendo em vista o baixo valor de mercado dos componentes em questão. No Cenário 2, o custo residual foi representado pelo valor de sucata da tubulação de cobre. Para estimar esse valor, foi necessário determinar a massa de cobre utilizada. De acordo com a SERAE³, a massa de tubo de cobre flexível de diâmetro de ½ pol é aproximadamente 0,277 kg/m e, de acordo com o valor tabelado da empresa Ferro Velho Litoral Limpo, a sucata de cobre tem um valor de R\$18,00/kg.

O valor do insumo energético se refere aos gastos com a energia elétrica consumida durante a operação de cada sistema. O valor da energia considerado foi de R\$0,54/kWh, que corresponde ao valor médio da energia elétrica brasileiro em 2017 (ANEEL).

O Cenário 1 não gera um subproduto durante a sua operação, contudo, no Cenário 2, o subproduto corresponde ao valor de venda da água economizada devido à redução do período transiente. Conforme os registros do Ministério das Cidades em 2016, o valor médio brasileiro da tarifa foi de R\$ 3,40/m³ de água.

Na Tabela 5.6, encontram-se os custos utilizados para a avaliação de cada um dos cenários de estudo, exceto o custo de insumo energético e o valor do subproduto, tendo em vista que ambos podem sofrer variações de acordo com o número de banhos diários e a duração de cada banho.

| Custo | Cenário 1 | Cenário 2 |
|----------------------------|------------------|------------------|
| Investimento Inicial [R\$] | 160 | 660 |
| Manutenção Anual [R\$] | 0 | 30 |
| Residual [R\$] | 0 | 53 |

Tabela 5.6. Custos de investimento inicial, custo de manutenção e valor residual dos Cenários 1 e 2.

As análises foram feitas baseadas em cinco casos distintos, cuja quantidade de banhos diários variam de 1 a 5 nas mesmas condições encontradas no Ensaio 6 da Seção 5.3. Além disso, foram levadas em consideração durações de banhos de 1 a 10 minutos. Essas variações alteram o custo do insumo energético, a quantidade de energia consumida e o fator de capacidade, que é a razão entre o número de horas de banhos ao longo de um ano e o número de horas contidas em um ano.

Para avaliar a potência instalada conforme a duração dos banhos, foi feita uma média dos valores contidos nos Gráficos 9 e 10 conforme o intervalo de tempo trabalhado. A comparação dos dois cenários deve ser feita considerando um mesmo benefício. Por conta disso, tendo em vista que no Cenário 2 se tem gastos superiores para reduzir o consumo de energia e assim obter condições equivalentes às obtidas no Cenário 1, considerou-se que o benefício em ambos os cenários corresponde à quantidade de energia

³ Serviço de Ensino de Refrigeração, Automação e Elétrica LTDA ME

consumida no Cenário 1, uma vez que esta é equivalente à energia que a água efetivamente deve receber para alcançar as condições de banho desejada.

Os valores da relação de Custo-Benefício obtidos em cada cenário foram plotados nos Gráficos 9 e 10.

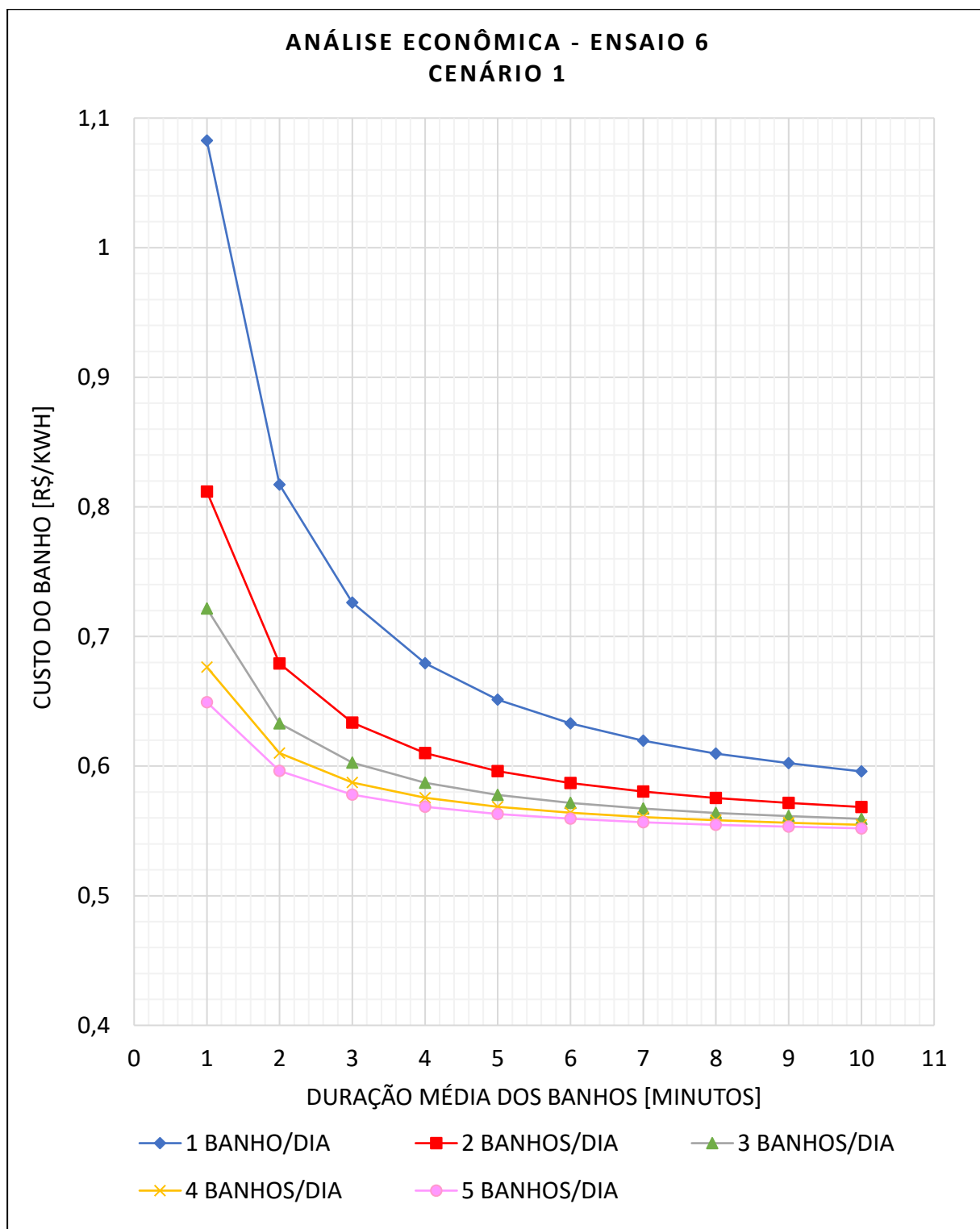


Gráfico 9. Relação Custo-Benefício do Cenário 1.

ANÁLISE ECONÔMICA - ENSAIO 6 CENÁRIO 2

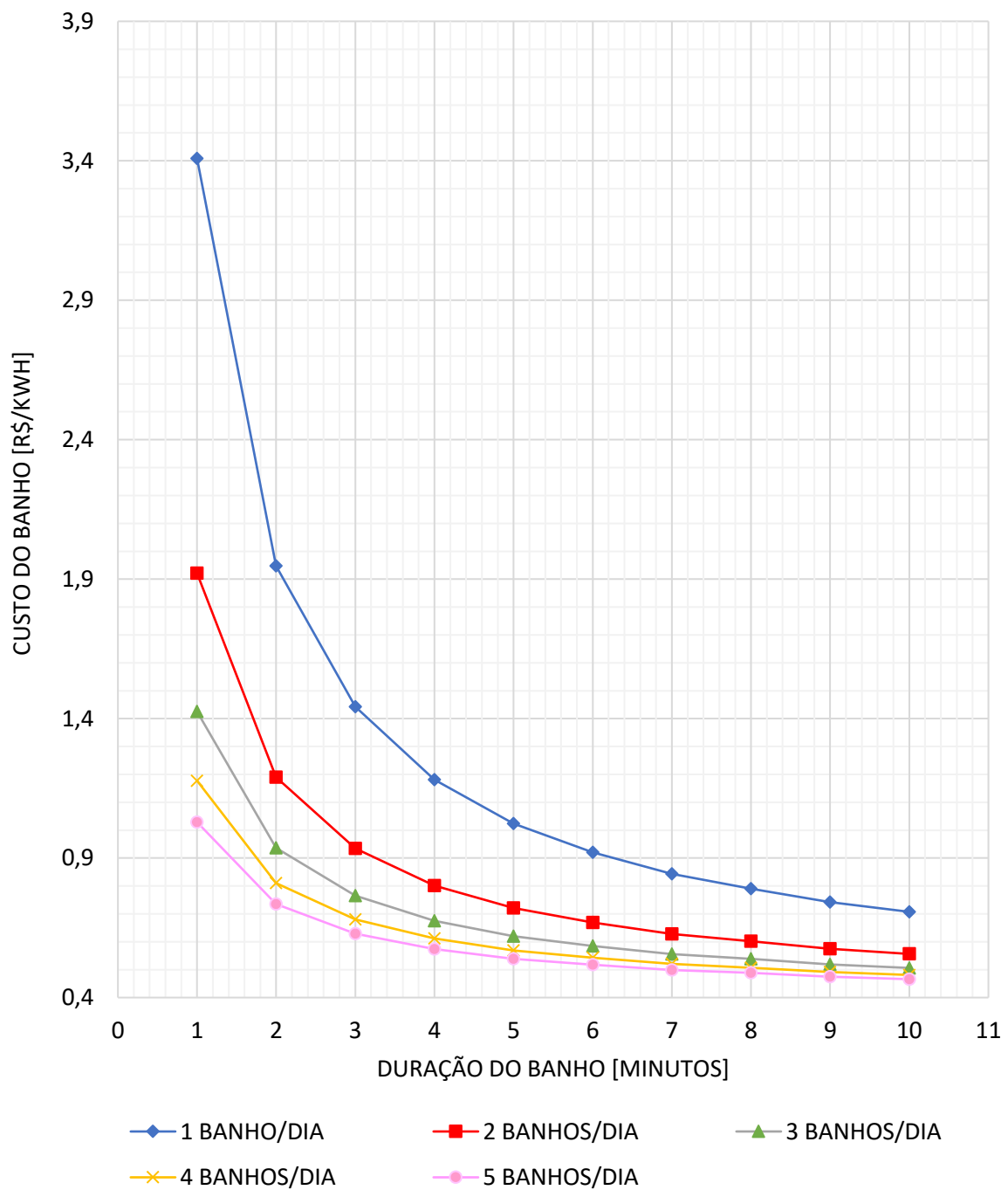


Gráfico 10. Relação Custo-Benefício do Cenário 2.

O Cenário 2 passa a ser mais vantajoso que o Cenário 1 quando as curvas dos custos dos banhos se cruzam. Observa-se que, à esquerda do ponto de cruzamento do Gráfico 11, cujas curvas se referem aos custos dos banhos na situação em que são tomados 3 banhos diários, o custo do banho do Cenário 1 é inferior ao do Cenário 2. Desta forma, nessas condições, é mais vantajoso economicamente utilizar um chuveiro elétrico e ralo convencionais. À direita do ponto de interseção, o custo do banho do Cenário

2 passa a ser inferior ao do Cenário 1, tornando mais vantajoso economicamente instalar um chuveiro com regulador automático de temperatura e o ralo-regenerador.

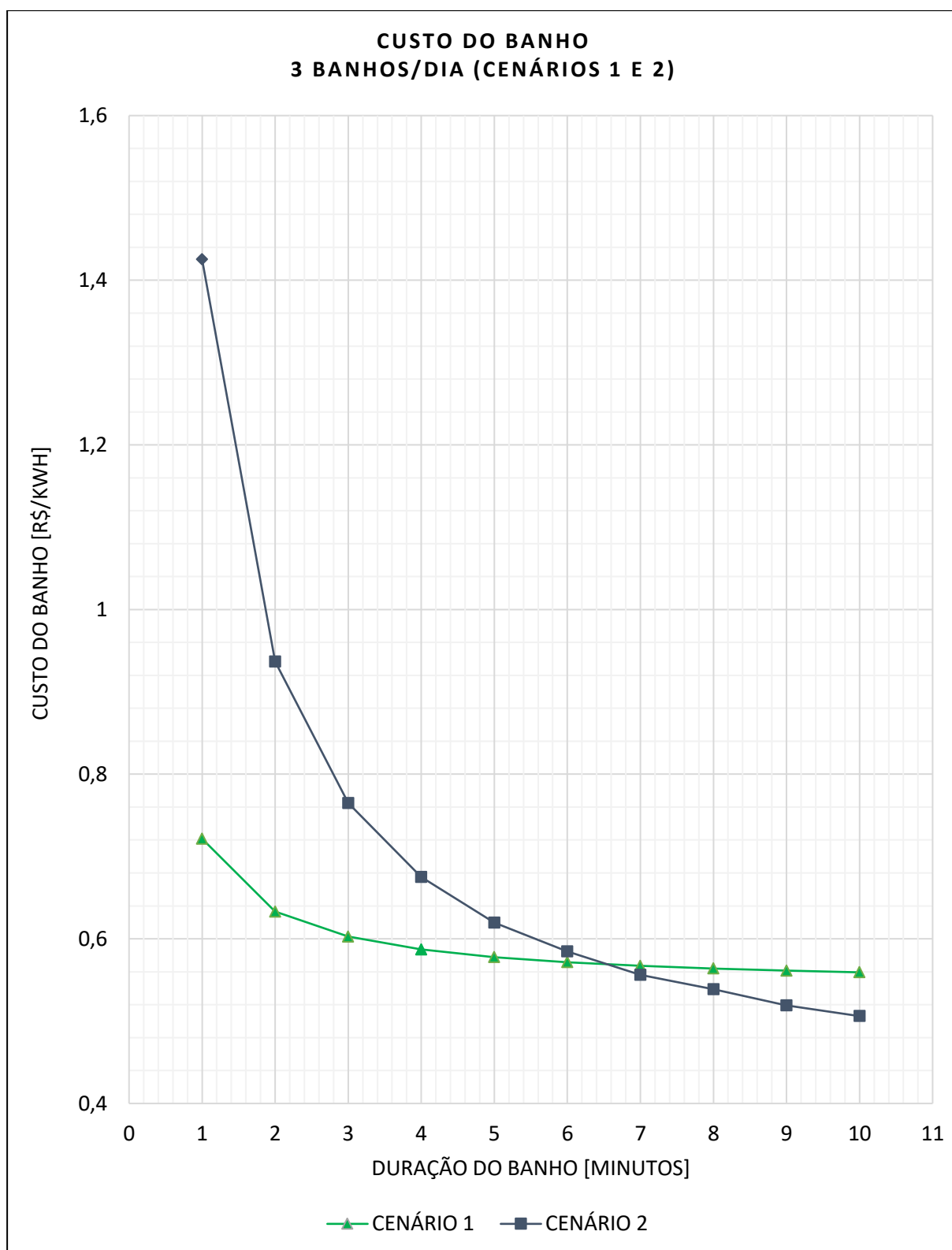


Gráfico 11. Curvas do custo do banho em função da duração do banho relativas aos Cenários 1 e 2 para 3 banhos diários.

O Cenário 2 não se mostrou vantajoso quando se toma apenas um banho diário de no máximo 10 minutos, por conta de a contribuição dos custos iniciais para o custo distribuído equivalente serem superiores aos ganhos com a redução do consumo de energia elétrica e água. Contudo, considerando a situação de apenas um banho por dia, com duração média de 16 minutos, a Análise Custo-Benefício mostra que o Cenário 2 é mais vantajoso. A Tabela 5.7 mostra as situações em que o Cenário 2 se mostrou favorável em relação ao Cenário 1 conforme o número de banhos diários utilizando um mesmo ralo-regenerador.

| Número de banhos diários | Duração mínima do banho [minutos] |
|---------------------------------|--|
| 1 | 16 |
| 2 | 9 |
| 3 | 7 |
| 4 | 5 |
| 5 | 4 |

Tabela 5.7. Condições em que o Cenário 1 é vantajoso em relação ao Cenário 2.

Considerando a duração média dos banhos de 10 minutos, foi verificado o tempo de retorno do investimento de acordo com a quantidade de banhos diários utilizando o mesmo regenerador. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 5.8.

| Número de banhos diários de duração de 10 minutos | Tempo de Retorno do Investimento [anos] |
|--|--|
| 2 | 6,2 |
| 3 | 2,7 |
| 4 | 1,8 |
| 5 | 1,3 |

Tabela 5.8. Tempo de retorno do investimento para banhos de 10 minutos de duração (Cenário 2).

5.4.1 ANÁLISE DE ERRO / INCERTEZA

Para verificar a incerteza da análise econômica, foi realizado um estudo de propagação de erros decorrentes da influência dos erros (incertezas) das grandezas que concorrem para o resultado da Análise Custo Benefício para os casos de banhos de duração média de 10 minutos.

Conforme visto no item 2.7, o Custo-Benefício (Equação 35) depende do custo do insumo energético, do custo de manutenção, do valor do subproduto, do investimento inicial, da taxa de juros, do valor residual, da vida útil da instalação e da potência instalada.

$$C/B = \left(CC + CM - VS + I \cdot i + \frac{(I-R) \cdot i}{(1+i)^p - 1} \right) \cdot \frac{1}{PI \cdot FC \cdot 8760} \quad (35)$$

O desvio do Custo-Benefício, $\Delta(C/B)$, é uma função da soma dos erros das variáveis de cálculo, mensurado conforme a seguinte expressão.

$$\Delta(C/B) = \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial CC} \right| \cdot \Delta CC + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial CM} \right| \cdot \Delta CM + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial VS} \right| \cdot \Delta VS + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial I} \right| \cdot \Delta I + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial i} \right| \cdot \Delta i + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial R} \right| \cdot \Delta R + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial v} \right| \cdot \Delta v + \left| \frac{\partial(C/B)}{\partial PI} \right| \cdot \Delta PI \quad (36)$$

Nessa seção foi analisada a interferência dos erros decorrentes das medições e as incertezas relativas às variações dos parâmetros na relação Custo-Benefício. Relativamente às parcelas que dependem das medições efetuadas, como o custo do insumo energético, o valor do subproduto e a potência instalada, foram feitas comparações entre as contribuições dos seus respectivos erros na relação Custo-Benefício. O erro de cada medição é composto de erros aleatório, de escala e propagado.

As grandezas mensuradas nos experimentos e que interferem na Equação 35 são: a vazão, a diferença de temperatura e a potência (verificada a partir dos dados de corrente e tensão). O erro relacionado à vazão exerce influência no valor do subproduto, o erro da diferença de temperatura interfere na potência instalada e a potência mensurada tem relação com o custo do insumo energético, que corresponde à energia efetivamente consumida pelo chuveiro.

Foi observado que o erro de medição da diferença de temperatura é de aproximadamente 1°C, o da vazão é de 0,2 litro e o da potência é de 0,06 kW. Analisando o comportamento da relação Custo-Benefício decorrente dos erros provenientes das medições, foi constatado que o erro referente à diferença de temperatura teve um impacto maior na função (de praticamente 100%) em relação aos das demais grandezas.

Outra análise que pode ser feita, é verificar como a Equação 35 reage ao alterar apenas uma variável, o que corresponde a uma análise de sensibilidade relacionada aos custos do projeto e à potência instalada. Os desvios relativos a esses fatores foram determinados conforme suas particularidades e trabalhados de forma semelhante à Equação 36, onde as variáveis que se mantiveram fixas correspondem a uma variação nula, cancelando os termos da expressão relativos aos custos que não se alteram.

Optou-se por considerar, ao variar o custo do insumo energético, o desvio padrão do custo da energia elétrica brasileira. O desvio padrão do kWh em 2016 foi de aproximadamente 0,04 reais. Essa

variação provocou uma alteração na relação Custo-Benefício equivalente a 0,03 reais. É possível constatar que o custo da energia elétrica da região onde se instalam as tecnologias do Cenário 2 exerce uma influência na relação, de maneira que os resultados observados podem sofrer variações quanto à duração média mínima dos banhos para que a tecnologia seja vantajosa. Porém, vale ressaltar que, de acordo com cada cidade, não é apenas o valor da energia elétrica que sofre alterações. As condições de temperatura da entrada de água fria e rendimento podem influenciar na análise.

Com relação ao custo de manutenção, foi adotado um erro na estimativa realizada na Seção 5.4 de 20 reais. Neste caso, a relação Custo-Benefício sofreu uma variação de 0,02 reais. Dessa forma, no caso de o custo considerado inicialmente estar superestimado, é possível que os resultados sejam beneficiados. Mas caso ocorra o contrário, é possível que sejam necessários banhos mais longos para garantir que o Cenário 2 seja vantajoso.

Foi levada em conta, alterando apenas o valor do subproduto, uma margem de erro que inclui a situação na qual não se economiza água. Ou seja, uma variação de custo equivalente ao valor de 0,7 litro de água economizada. Essa alteração não provocou um desvio significativo no Custo-Benefício, indicando que a quantidade de água economizada pouco influencia na relação.

O peso do custo do investimento inicial foi analisado utilizando uma variação consideravelmente elevada de 200 reais, para verificar se, ao baratear os custos dos equipamentos, é possível obter uma melhoria significativa nos resultados. Esse desvio resultou em uma incerteza de 0,04 reais da relação Custo-Benefício, a qual indica que vale a pena investir em alternativas para facilitar a fabricação do regenerador e reduzir o custo do chuveiro com regulador automático de temperatura.

O desvio da taxa de juros aplicado foi de 0,03% ao ano, o que corresponde ao desvio padrão da taxa Selic de 2015 a 2018 de acordo com o histórico do Banco Central, resultando em um desvio de 0,02 reais na relação Custo-Benefício.

A variação do valor residual utilizada foi equivalente ao valor da própria sucata de cobre, para analisar como se comporta a relação levando em conta a situação que menos favorece o uso das tecnologias, na qual o usuário não realiza a venda dos componentes da instalação ao término de sua vida útil. Contudo, essa situação resultou em uma variação de 0,01 reais do Custo-Benefício que pouco altera a análise econômica elaborada.

Foi considerado que o desvio da vida útil da instalação se mantém em uma faixa de 10 anos para mais ou para menos dos 30 anos considerados, resultando em um desvio de 0,03 reais na função. A vida útil da instalação se refere à frequência em que se realiza a reposição dos custos relativos principalmente ao investimento inicial. Tendo em vista, que esse custo exerce um peso considerável na análise, como foi observado, quanto maior for a vida útil dos equipamentos, mais o seu uso se torna vantajoso.

Por fim, a variável cujo peso na relação estudada se mostrou superior às demais foi a potência instalada. Ela tem uma relação direta com a variação de temperatura, a qual exerce uma grande

influência no rendimento do ralo-regenerador, conforme verificado nos experimentos. Considerando um desvio entre a potência máxima do chuveiro (7,5 kW) e a média consumida durante todo o Ensaio 6 (6,5 kW), foi constatado que ela provocou um desvio na relação Custo-Benefício de 0,08 reais, capaz de alterar significativamente os resultados. Essa constatação reafirma que, em climas mais frios, é possível obter resultados ainda mais vantajosos com o uso do ralo-regenerador associado ao chuveiro com regulador automático de temperatura.

Foi confeccionado o Gráfico 12, o qual ilustra o percentual em que cada um dos componentes do custo influenciou na relação Custo-Benefício, a partir dos custos envolvidos no Cenário 2, quando se tomam 3 banhos por dia e cada um com duração de 10 minutos.

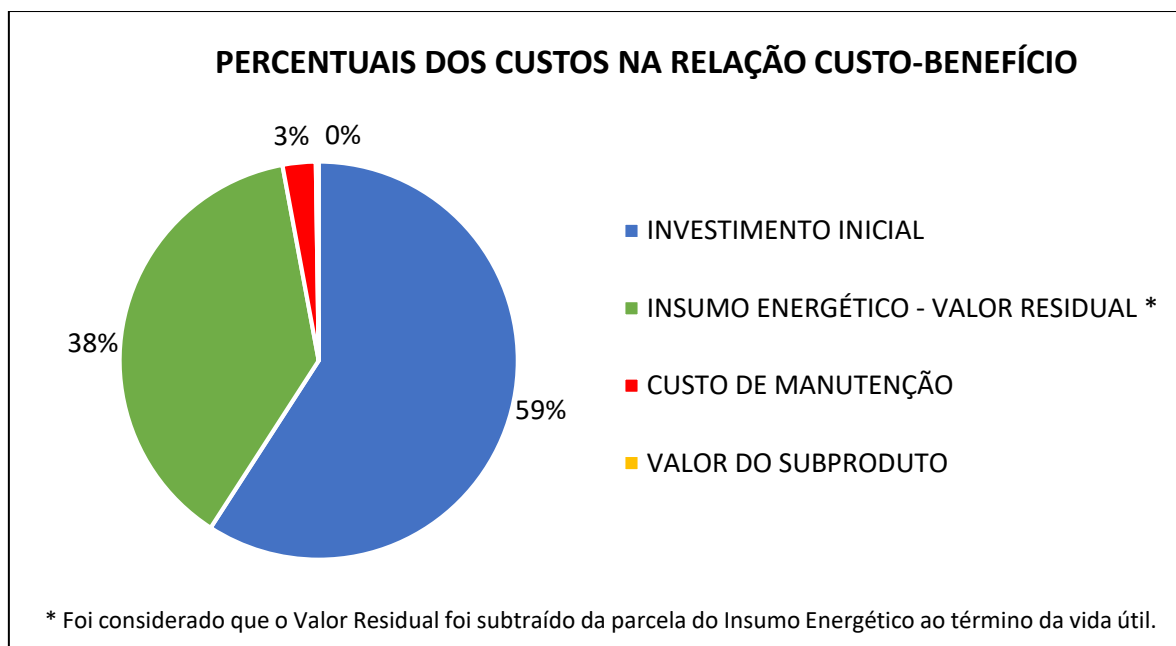


Gráfico 12. Percentuais dos custos na relação Custo-Benefício.

De acordo com este gráfico, verifica-se uma maior contribuição dos custos do investimento inicial e do insumo energético (subtraído do valor residual) e uma menor contribuição do valor do subproduto e do custo de manutenção na relação. Com base nesta observação, é possível reafirmar que investir em métodos de fabricação das tecnologias do Cenário 2, a fim de barateá-las, pode contribuir para que a vantagem apresente uma melhoria significativa em relação ao Cenário 1. Além disso, por conta de a parcela de água economizada em cada banho ser muito inferior ao volume de água utilizado, o valor do subproduto não exerce uma influência significativa na relação Custo-Benefício.

Como forma de baratear o custo do chuveiro com regulador automático de temperatura, é possível simplificar a sua fabricação pela redução da quantidade de recursos disponíveis no modelo utilizado, tendo em vista que, além de controlar a temperatura, continha iluminação em LED e controle remoto e mostrava em um *display* a quantidade de água utilizada por banho, a vazão de água, a duração do banho, o consumo de energia e uma estimativa do custo mensal dos banhos. Com relação ao

regenerador, é possível investir em métodos de fabricação em larga escala que tornem o processo mais simples e como consequência o custo mais reduzido.

CONCLUSÃO E OBSERVAÇÕES FINAIS

Os experimentos realizados buscaram comparar o desempenho de dois cenários de banhos, um utilizando um chuveiro elétrico e ralo convencionais (Cenário 1) e outro, um chuveiro com regulador automático de temperatura com um ralo-regenerador de configuração helicoidal de tubos concêntricos (Cenário 2). Os ensaios em regime permanente e transiente permitiram verificar a eficiência e a quantidade de água que se economiza por banho no Cenário 2. Apesar da dificuldade de controlar a temperatura da água da rede de abastecimento e do banho (devido às limitações do chuveiro utilizado), foi possível analisar o comportamento das tecnologias.

O regenerador pré-aquece a água proveniente da rede de abastecimento, através da troca de calor com a água quente que sai pelo ralo, antes que ela chegue ao chuveiro. Dessa forma a quantidade necessária de energia consumida para aquecer a água até uma determinada temperatura escolhida para o banho se reduz. Além disso, essa associação diminui o intervalo de tempo para que a água que sai do chuveiro atinja a temperatura desejada e, considerando que este momento caracteriza o início do banho, evita-se que uma parcela de água seja desperdiçada.

Foi possível verificar uma relação crescente da diferença entre o ganho de temperatura na água da rede com a economia de água por banho e a eficiência observada no Cenário 2, indicando que em regiões mais frias é possível obter rendimentos superiores e maior economia de água.

Os dados foram coletados em Brasília durante os meses de setembro e outubro de 2018, período em que a temperatura da água da rede de abastecimento girou em torno de 30°C e a temperatura ambiente se encontra elevada, fazendo com que o aumento de temperatura fosse menor. Dessa forma, houve uma redução na eficiência da tecnologia testada.

Obteve-se no Ensaio 6 um rendimento de 28,7% (em regime permanente) e uma economia de água de 0,7 litro, com uma diferença de temperatura de aproximadamente 13°C. Por ser este resultado obtido o mais próximo de condições de inverno, onde a diferença de temperatura é relativamente grande, o Ensaio 6 foi tomado como base para confeccionar a análise econômica. Considerou-se ainda na análise que, em que ambos os cenários, as instalações foram feitas na construção do banheiro, desconsiderando custos de reforma para a instalação do ralo.

Da análise econômica pôde-se observar as condições em que o Cenário 2 se mostrou mais vantajoso que o Cenário 1. Em geral, o Cenário 2 contribui para reduzir os gastos de energia elétrica e água, embora se tenha custos superiores referentes ao investimento inicial em equipamento e à manutenção.

Os experimentos realizados foram feitos de forma conservadora no sentido de que foi aguardado, entre dois os ensaios consecutivos, que a temperatura em cada ponto no interior do regenerador se estabilizasse termicamente com a temperatura da água da rede. Situações com um

intervalo curto entre banhos, nas quais a temperatura da água no interior do regenerador ainda se encontre aquecida no início de um banho, beneficiam a relação Custo-Benefício do Cenário 2, tornando-a mais vantajosa. No limite, a condição de dois banhos consecutivos pode ser comparada com àquela de banhos com durações maiores, os quais apresentaram um melhor desempenho nas relações Custo-Benefício do Cenário 2.

Para a maior vazão testada (6 l/min), a perda de carga foi de 3,6 mca. Caso esta perda seja excessiva na instalação predial, podem ser buscadas soluções para a compensação da perda. Dentre as alternativas, tem-se a utilização de uma bomba de água (por vezes embutida no próprio chuveiro). Esta opção teria um impacto apenas no investimento inicial, pois a energia gasta pela bomba para vencer a perda de carga seria incorporada no aumento da temperatura da água, diminuindo (de forma discreta) a dissipação na resistência elétrica.

Ao comparar as quantidades de banhos diários com duração de dez minutos, o Cenário 2 apresentou mais vantagens quando são tomados com uma frequência a partir de dois banhos diários (em um mesmo equipamento). Essa condição leva em torno de 6 anos para obter o retorno do investimento. Contudo, quanto mais banhos são tomados por dia, mais esse cenário se mostra vantajoso, como no caso em que são tomados três banhos diários, onde o retorno passa a levar cerca de 2,7 anos, ou no caso de 4 banhos diários, que leva cerca de 1,8 anos para se observar o retorno do investimento.

A partir da análise de sensibilidade da relação Custo-Benefício, ficou confirmado que a diferença de temperatura é o fator que mais influencia o desempenho da tecnologia testada. Além desse fator, foi constatado ainda que o custo do investimento inicial tem uma participação considerável nesta análise. Tendo em vista que o investimento inicial se mostrou elevado, investir em formas de baratear a construção do ralo-regenerador e o custo do chuveiro com regulador automático de temperatura pode favorecer o uso dessas tecnologias.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a realização de novos experimentos para avaliar o rendimento do regenerador. Os dois cenários sugeridos utilizariam um chuveiro convencional, sendo que em um deles o chuveiro estaria associado a um ralo-regenerador e no outro a um ralo convencional. Nessas condições, espera-se que o cenário que emprega o ralo-regenerador apresente uma temperatura de banho superior à encontrada no cenário do ralo convencional, guardadas a mesma vazão e temperatura da água da rede de abastecimento. A partir do ganho em temperatura da água observado do ralo-regenerador, será possível avaliar a quantidade de energia reaproveitada.

Essa forma de conduzir o experimento reduz algumas das dificuldades encontradas no presente trabalho, como a de garantir as mesmas condições de temperaturas dentro de um mesmo ensaio trabalhando com dois modos distintos de operação do chuveiro (temperatura e potência). Assim, será possível observar a eficácia do ralo-regenerador em outras situações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª Edição. Brasília: ANEEL, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Ranking das Tarifas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em: 31/05/2018.

AGEX DO BRASIL. **Hidrômetro Unijato US 3.0 DN20x115mm**. Disponível em: <<http://www.kitcopasa.com.br/HidrometrounijatoUS3-0DN20x115mm.php>>. Acesso em: 08/06/2018.

Ali, S. **Pressure Drop Correlations for Flow Through Regular Helical Coil Tubes**. Aligarh Muslim University, 2000.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das Taxas de Juros**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/c/COPOMJUROS/>>. Acesso em: 15/11/2018.

BAÚ ELETRÔNICA COMPONENTES ELETRÔNICOS. **Sensor de Temperatura LM35**. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-temperatura-lm35.html>>. Acesso em: 08/06/2018.

Braga, N.C. **Como funciona o Chuveiro Elétrico**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/2936-el033>>. Acesso em: 20/05/2018.

Brzustowski, T.A., Golem, P.J. **Second-Law Analysis of Energy Processes – Part I: Exergy – An Introduction**. Transactions of the Society for Mechanical Engineers, v.4, n.4, 1977.

Campbell Scietific. **Datasheet: CR1000 Specifications**, 2017.

CAMPBELL SCIETIFIC. **CR1000**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.es/cr1000>>. Acesso em: 08/06/2018.

Carvalho, M.O.M. **Avaliação Econômica de Projetos de Energia**. Universidade de Brasília, 2005.

Çengel, Y.A., Ghajar, A.J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, 4ª Edição. AMGH, 2012.

CENTRO INTERNACIONAL DE REFERÊNCIA EM REÚSO DE ÁGUA. **Estudo da USP Mostra Chuveiro Elétrico Como Opção Mais Econômica Para o Banho**. CIRRA, 2009.

DOCOL METAIS E SANITÁRIOS. **De Quanto Tempo Você Precisa Para Tomar Banho?** Disponível em: <<http://www.docol.com.br/planetaagua/h2o/de-quanto-tempo-voce-precisa-para-tomar-banho/>>. Acesso em: 15/06/2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Projeções da Demanda de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Eficiência Energética na Indústria e nas Residências no Horizonte Decenal (2010-2019)**. EPE, 2010.

Exatron. **Manual do Fabricante: Ducha Sensorial My Shower – Modelo: CHUD2EBC**.

Lakhani, P. **Experimental and theoretical studies of nanofluid Al₂O₃/SiC in shell and tube heat exchanger - Scientific Figure on ResearchGate**. Martin Luther University Halle-Wittenberg, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/shows-the-temperature-profile-along-the-length-of-a-1-2-exchangers-and-2-4_fig1_323084939>. Acesso em: 07/11/2018.

FERRO VELHO LITORAL LIMPO. **Preços da Sucata Ferrosa e Não Ferrosa**. Disponível em: <<https://www.litorallimpo.com.br/precos/>>. Acesso em: 31/05/2018.

Filho, D.O., Tanabe, C.S., Costa, J.M. **Considerações da Análise Exergética em Tarifas de Energia Elétrica**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2000.

Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 6ª Edição. LTC, 2006.

Goldemberg, J. **Dossiê Recursos Naturais**. Universidade de São Paulo, 1998.

HU INFINITO. **Sensor de Corrente Não Invasivo – SCT 013 – 100 A**. Disponível em: <http://www.huinfinito.com.br/sensores/956-sensor-de-corrente-nao-invasivo-sct013-100a.html?search_query=sensor+de+corrente&results=35>. Acesso em: 04/11/18.

Huaiming, J., Zhiyong, H., Yuanhui, X., Bing, D., Yu, Y. **Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil-Pipe**. Journal of Nuclear Science and Technology, 2001.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6ª Edição. LTC, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMATIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Tabela de Consumo de Energia Elétrica: Chuveiros Elétricos**. INMETRO, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. MME, 2017.

Neiva, M.D.S. **Regenerador para Chuveiro – 2ª Fase**. Universidade de Brasília, 2005.

SAGA MEDIÇÃO. **Catálogo de Produtos: Linha Residencial: Medidores Unijato Velocimétricos pra Medição de Água Fria e Quente**.

OPEN ENERGY MONITOR. **CT Sensors – Interfacing With a Arduino**. Disponível em: <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>>. Acesso em: 04/11/2018.

OPEN ENERGY MONITOR. **Biblioteca do Arduino – EmonLib.cpp**. Disponível em: <<https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>>. Acesso em: 04/11/2018.

TEC MUNDO. **My Shower: Conheça a Primeira Ducha Sensorial do Brasil**. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/curiosidade/104650-myshower-conheca-primeira-ducha-sensorial-brasil.htm>>. Acesso em: 08/06/2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35: Precision Centigrade Temperature Sensors**. National Semiconductor Corporation, 2000.

Tomé, M.C. **Análise do Impacto do Chuveiro Elétrico em Redes de Distribuição no Contexto da Tarifa Horossazonal**. Universidade de Campinas, 2014.

MINISTÉRIO DAS CIDADES – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Escotos**. SNIS, 2016. Disponível em: <http://etes-sustentaveis.org/wp-content/uploads/2018/03/Diagnostico_AE2016.pdf>. Acesso em: 24/10/2018.

ZÜRICH. **Manômetro Digital – Z. 10. B**. Disponível em: <<https://logismarketbr.cdnwm.com/ic/zurich-industria-e-comercio-ltda-manometro-digital-684567.pdf>>. Acesso em: 04/11/2018.

APÊNDICE

Pág.

| | | |
|-------------|---|----|
| Apêndice I | Gráficos de Temperatura em Função do Tempo dos Ensaios da Etapa 1 de Experimentos em Regime Permanente | 73 |
| Apêndice II | Gráficos de Temperatura e Corrente em Função do Tempo dos Ensaios da Etapa 2 de Experimentos em Regime Transiente | 77 |

APÊNDICE I: Gráficos de Temperatura em Função do Tempo dos Ensaios da Etapa 1 de Experimentos em Regime Permanente

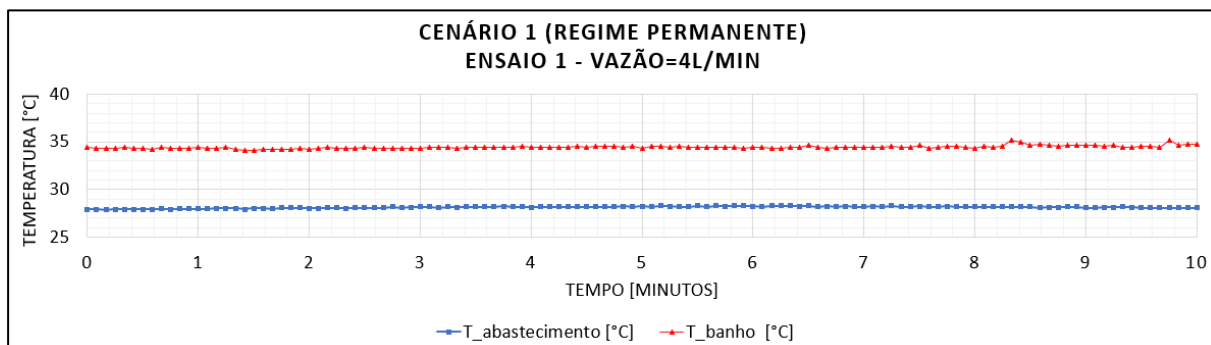


Gráfico 13. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 1 (Cenário 1) em regime permanente.

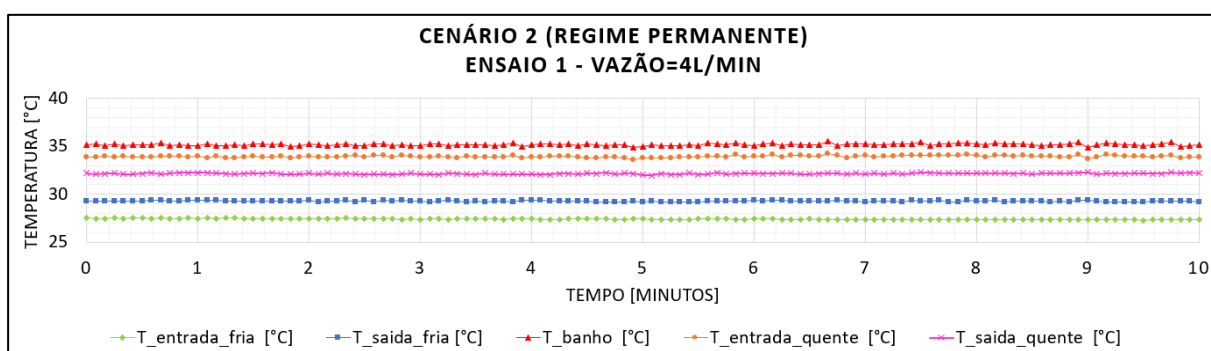


Gráfico 14. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 1 (Cenário 2) em regime permanente.

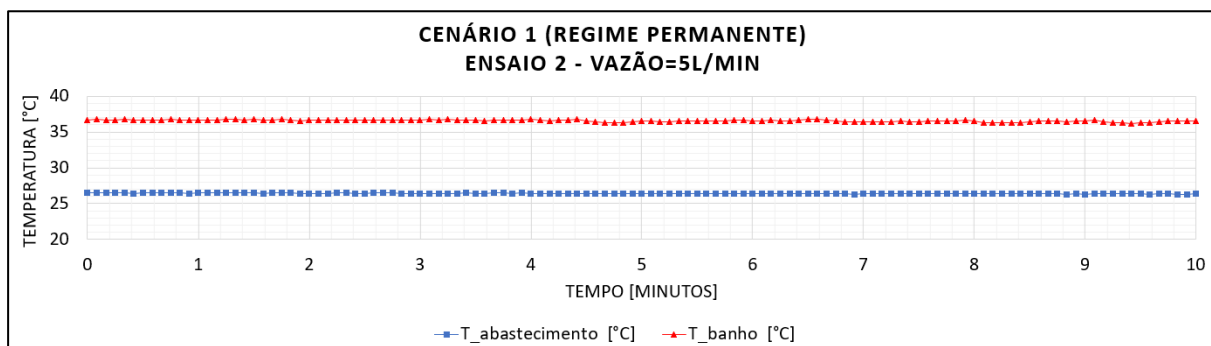


Gráfico 15. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 2 (Cenário 1) em regime permanente.

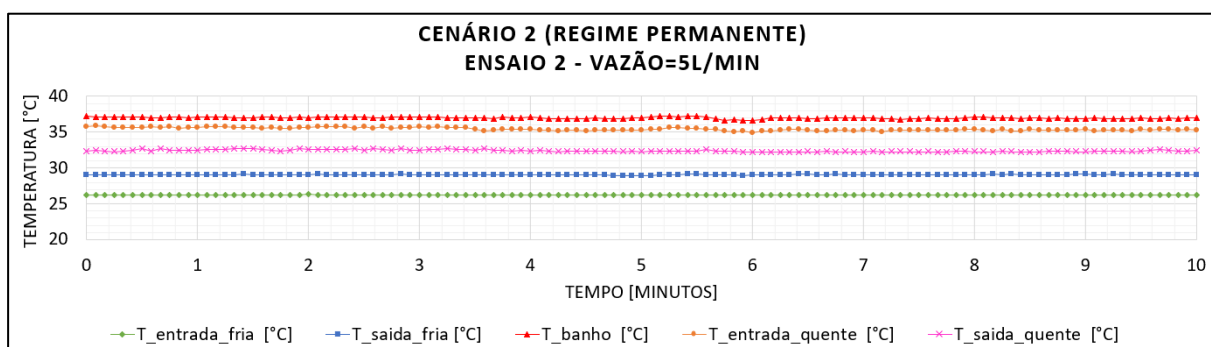


Gráfico 16. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 2 (Cenário 2) em regime permanente.

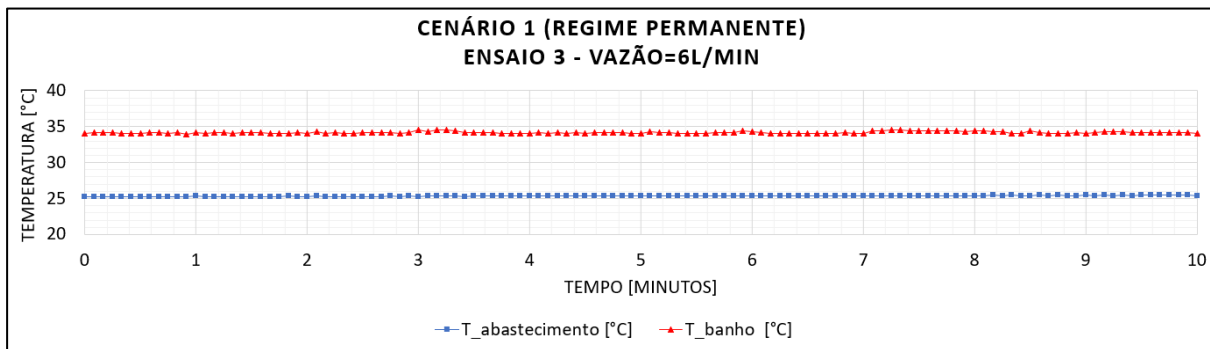


Gráfico 17. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 3 (Cenário 1) em regime permanente.

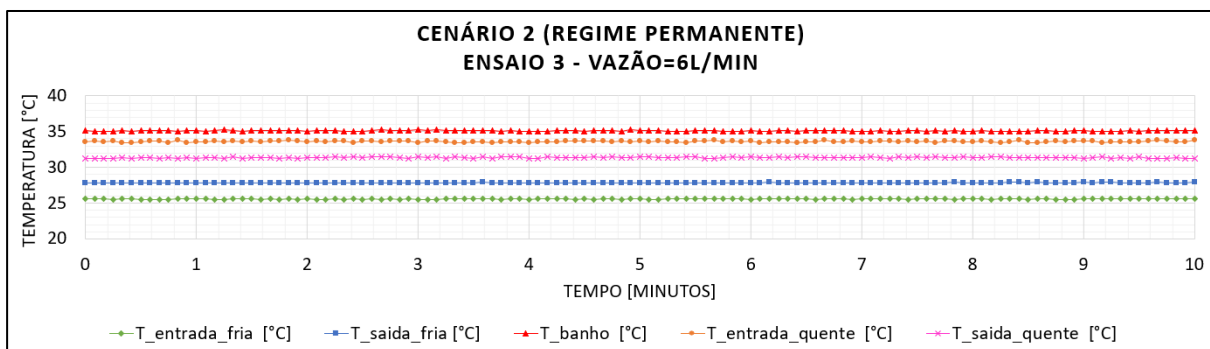


Gráfico 18. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 3 (Cenário 2) em regime permanente.

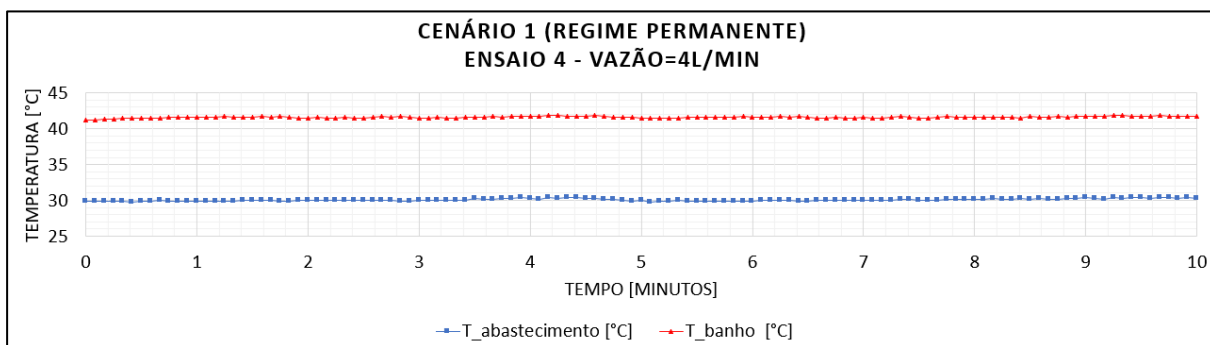


Gráfico 19. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 4 (Cenário 1) em regime permanente.

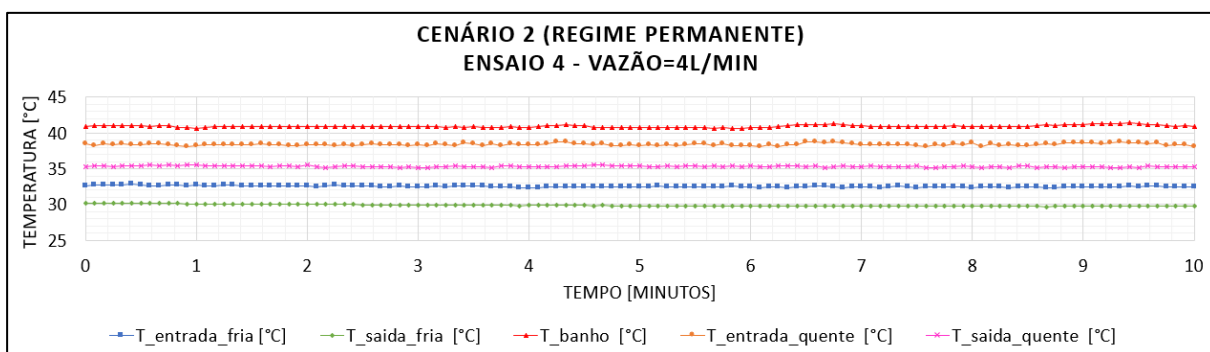


Gráfico 20. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 4 (Cenário 2) em regime permanente utilizando o chuveiro no modo temperatura.

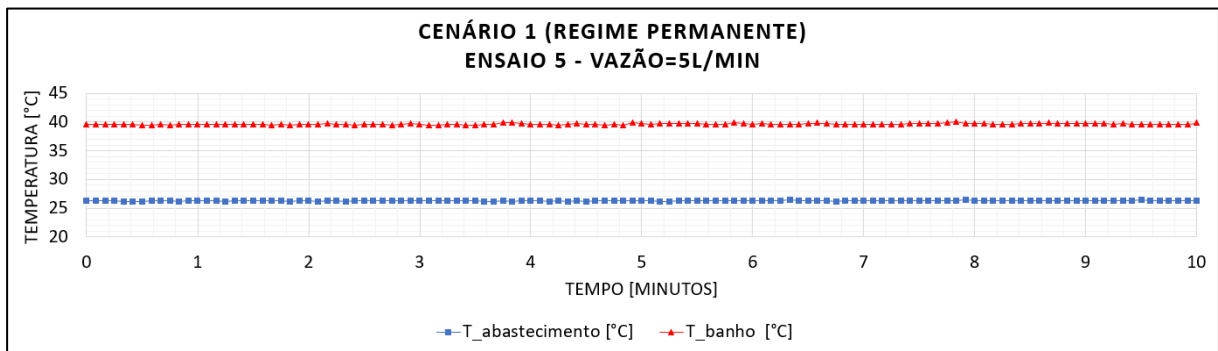


Gráfico 21. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 5 (Cenário 1) em regime permanente.

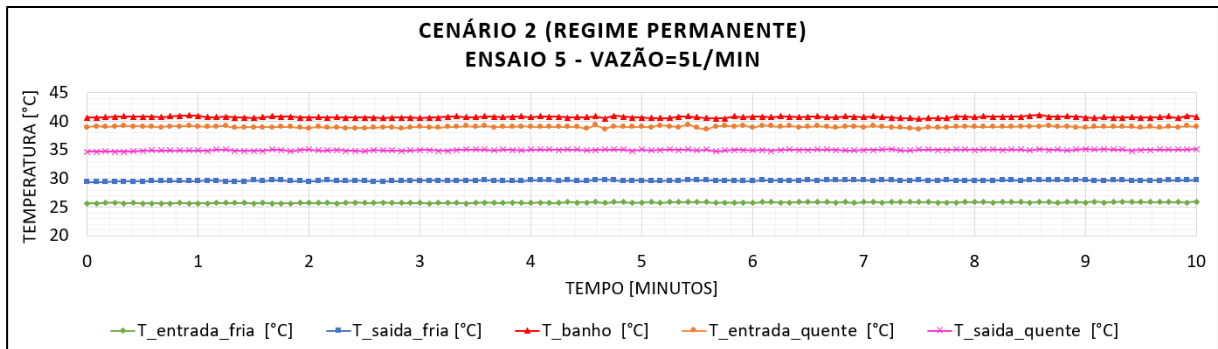


Gráfico 22. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 5 (Cenário 2) em regime permanente.

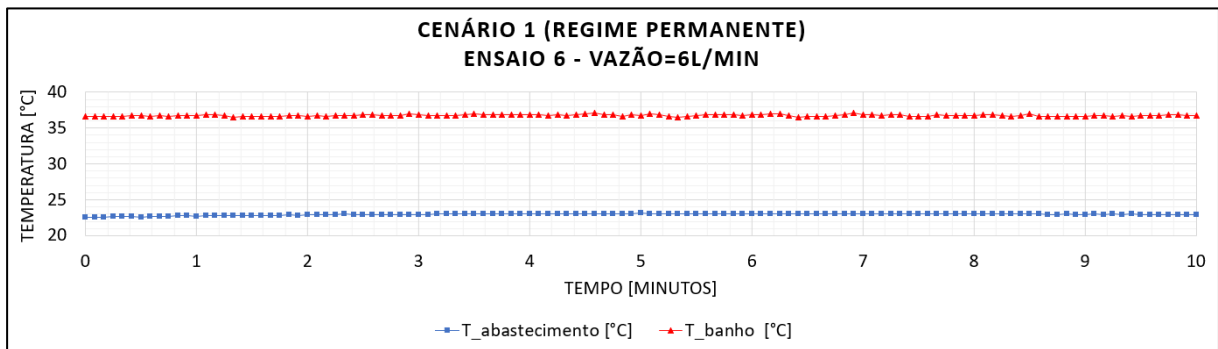


Gráfico 23. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 6 (Cenário 1) em regime permanente.

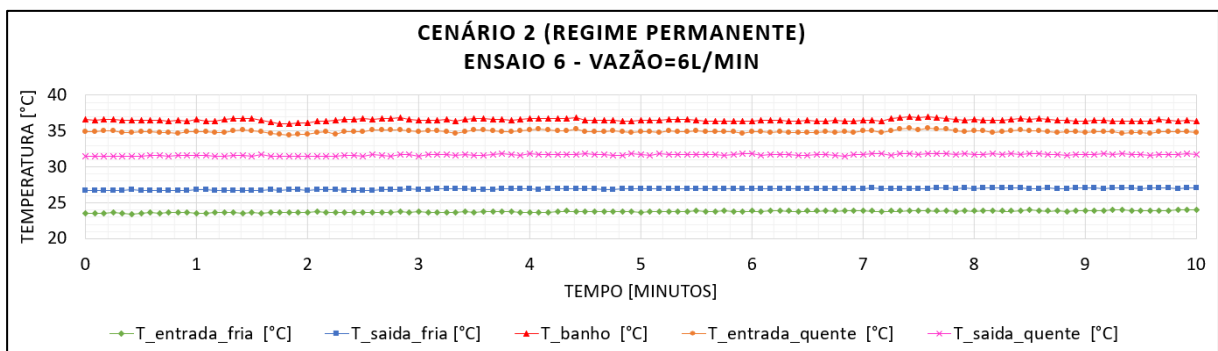


Gráfico 24. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 6 (Cenário 2) em regime permanente.

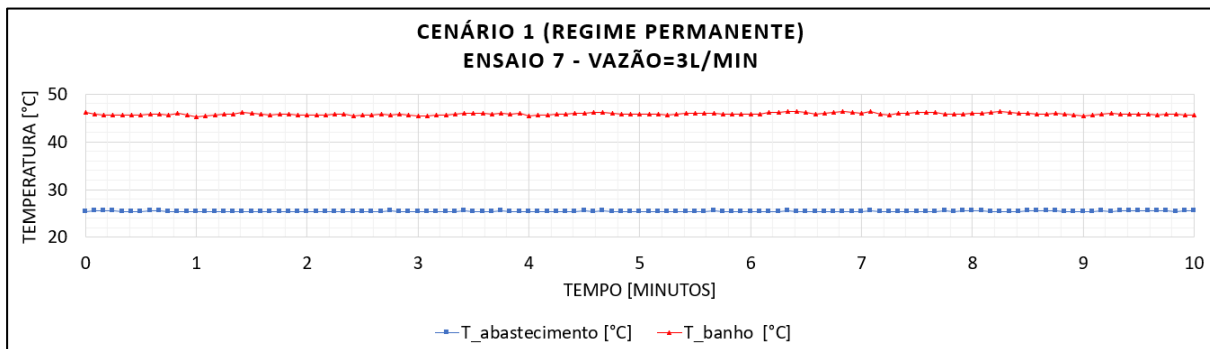


Gráfico 25. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 7 (Cenário 1) em regime permanente.

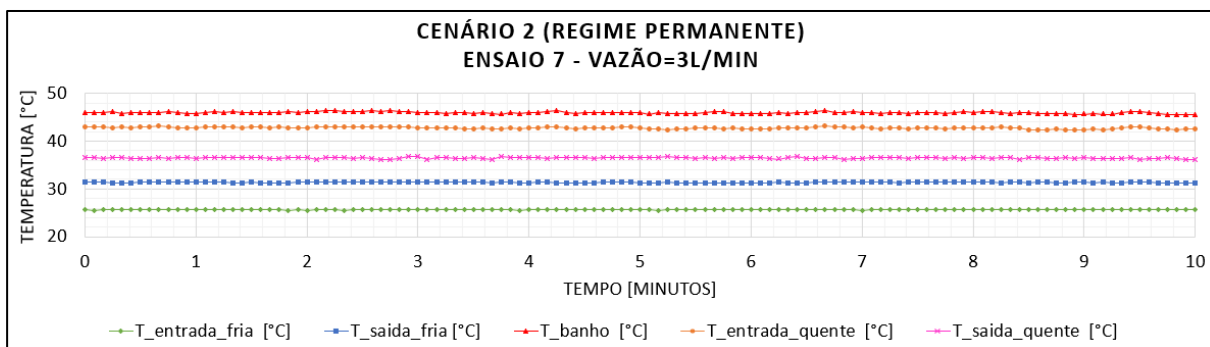


Gráfico 26. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 7 (Cenário 2) em regime permanente.

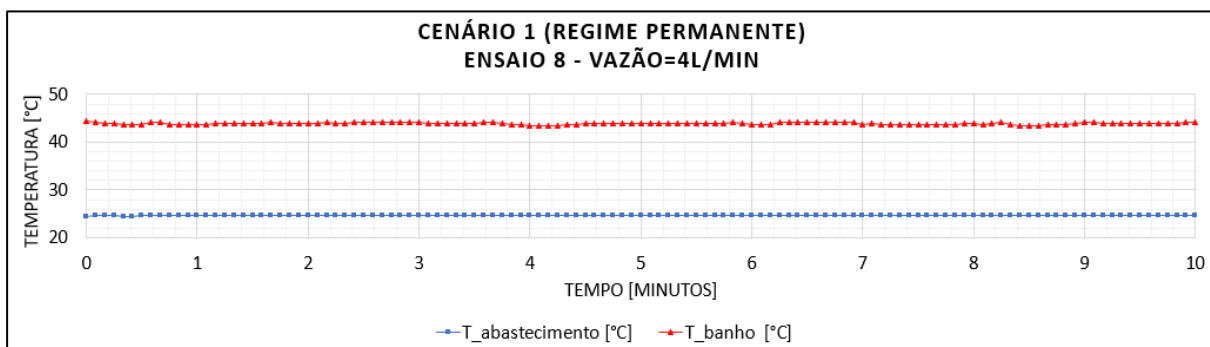


Gráfico 27. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 8 (Cenário 1) em regime permanente.

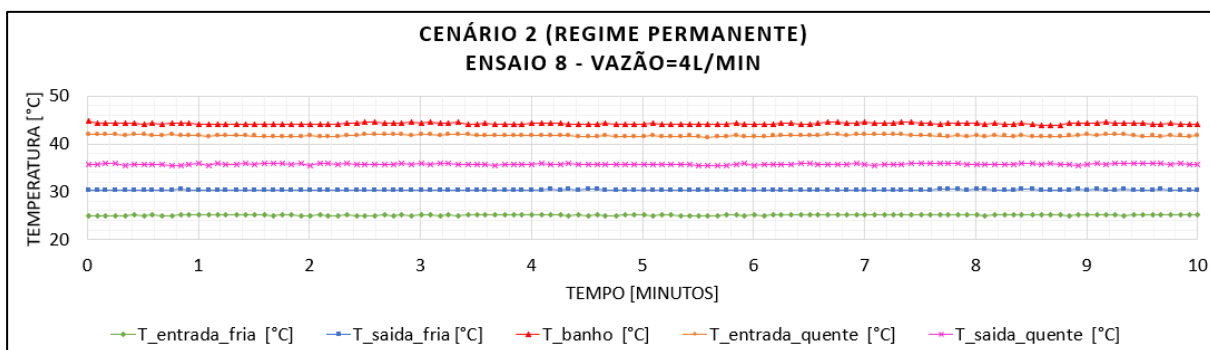


Gráfico 28. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 8 (Cenário 2) em regime permanente.

APÊNDICE II: Gráficos de Temperatura e Corrente em Função do Tempo dos Ensaios da Etapa 1 de Experimentos em Regime Transiente

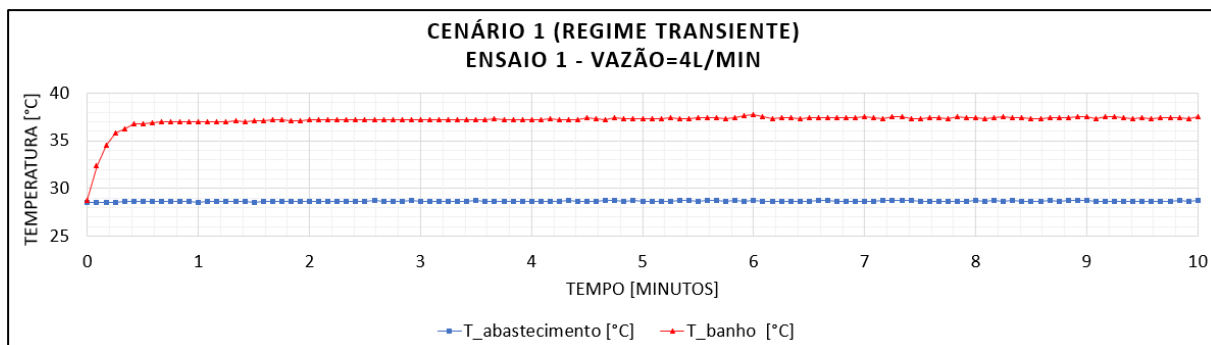


Gráfico 29. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 1 (Cenário 1) em regime transiente.

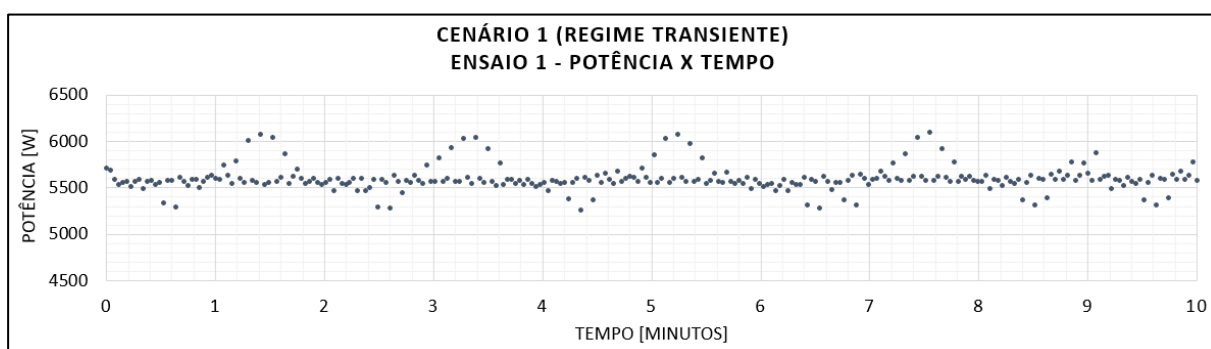


Gráfico 30. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 1 (Cenário 1) em regime transiente.

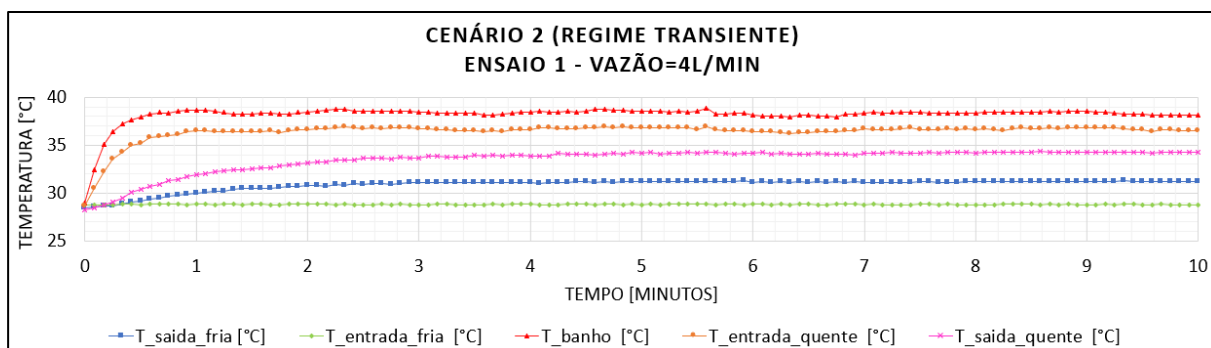


Gráfico 31. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 1 (Cenário 2) em regime transiente.

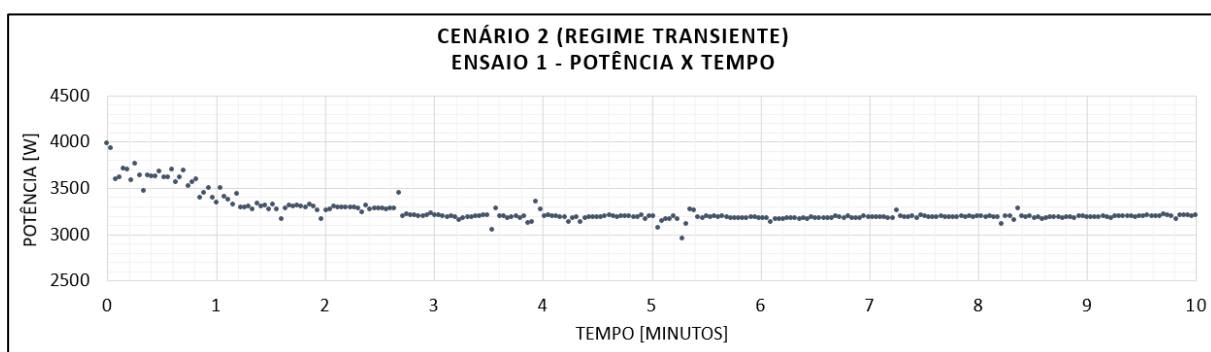


Gráfico 32. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 1 (Cenário 2) em regime transiente.

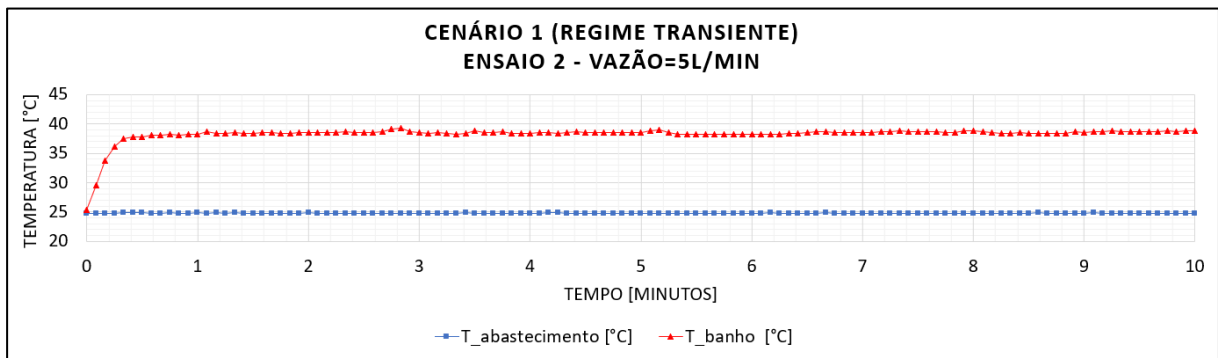


Gráfico 33. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 2 (Cenário 1) em regime transiente.

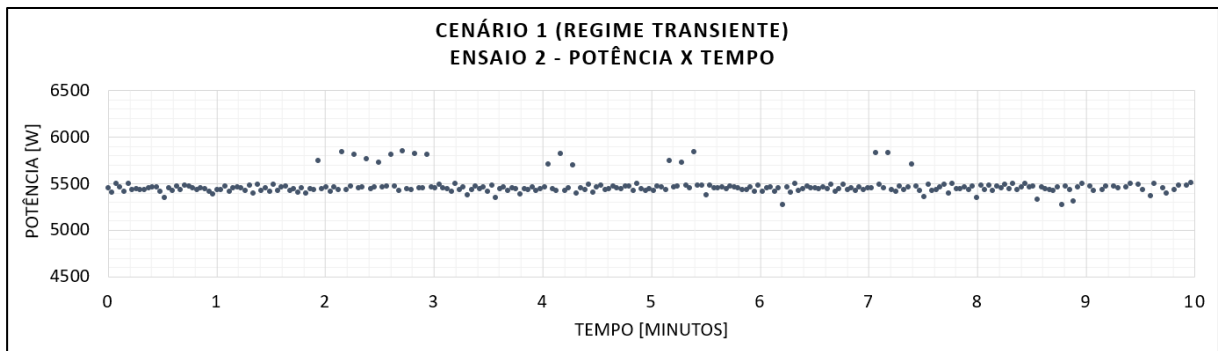


Gráfico 34. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 2 (Cenário 1) em regime transiente.

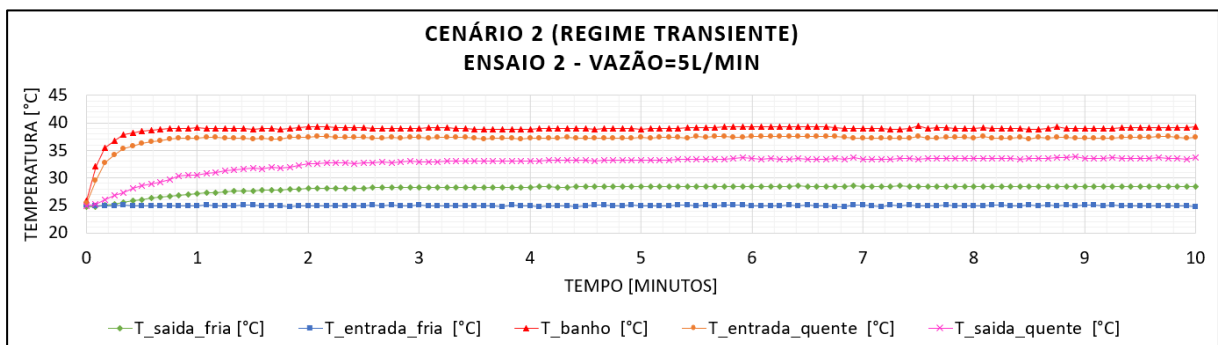


Gráfico 35. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 2 (Cenário 2) em regime transiente.

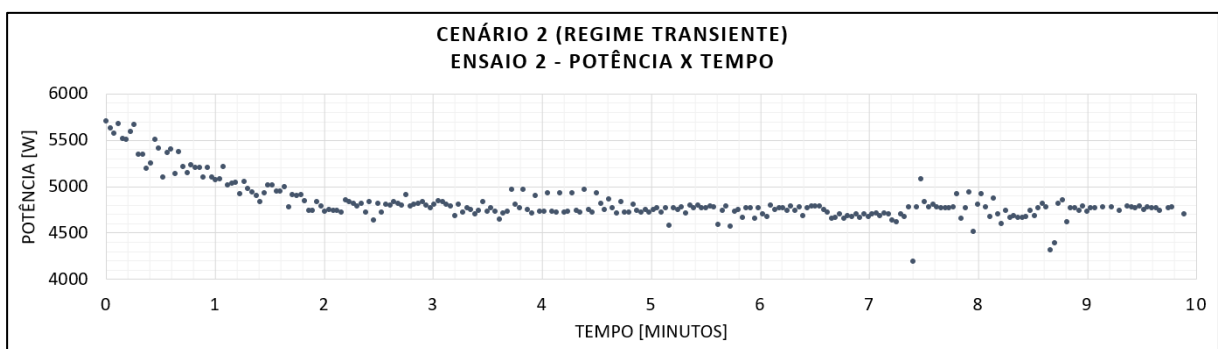


Gráfico 36. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 2 (Cenário 2) em regime transiente.

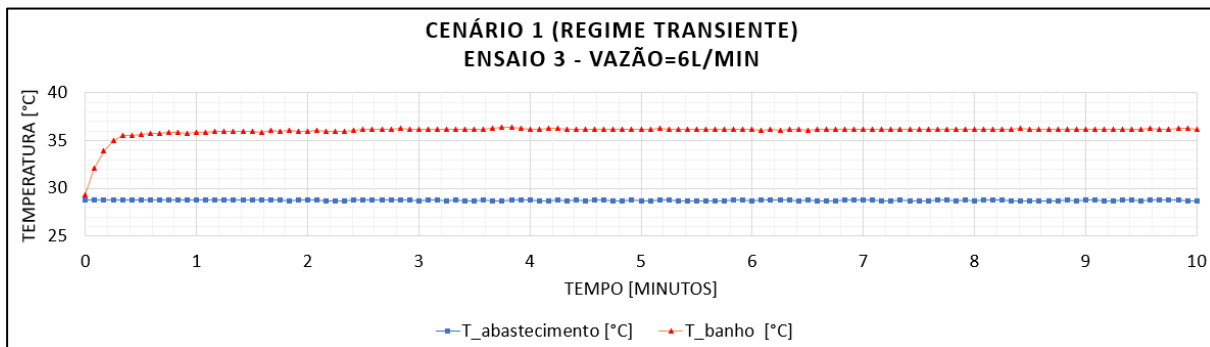


Gráfico 37. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 3 (Cenário 1) em regime transiente.

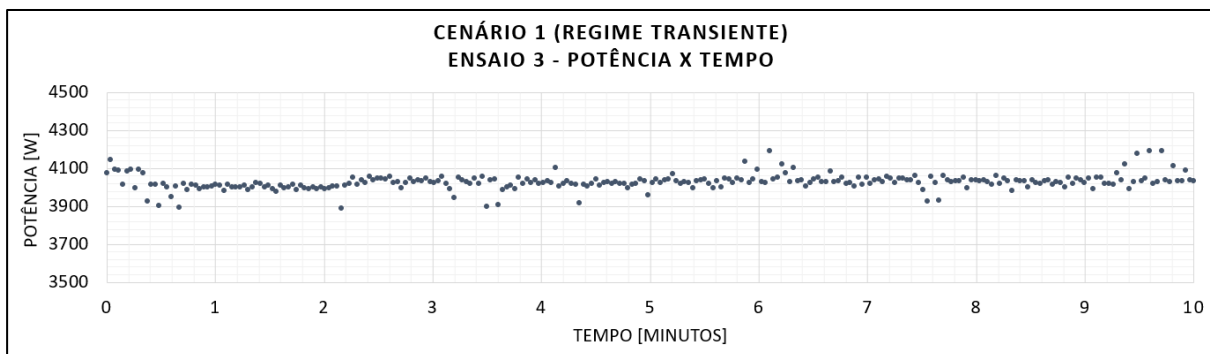


Gráfico 38. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 3 (Cenário 1) em regime transiente.

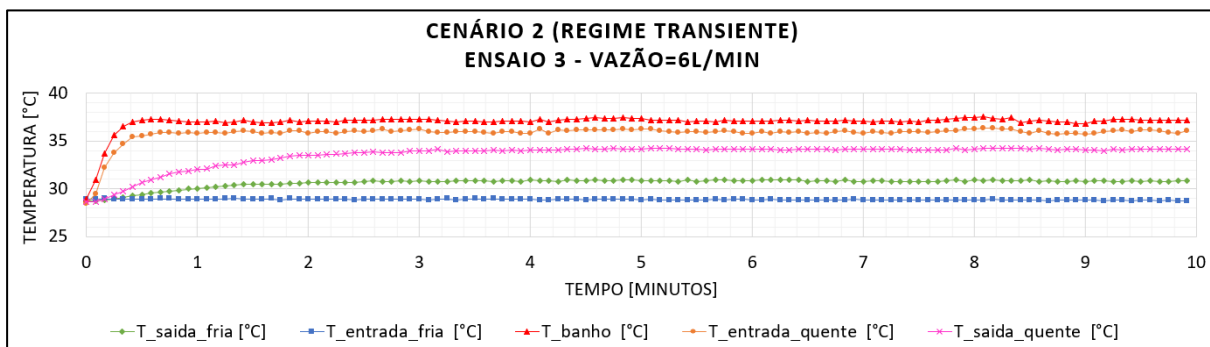


Gráfico 39. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 3 (Cenário 2) em regime transiente.

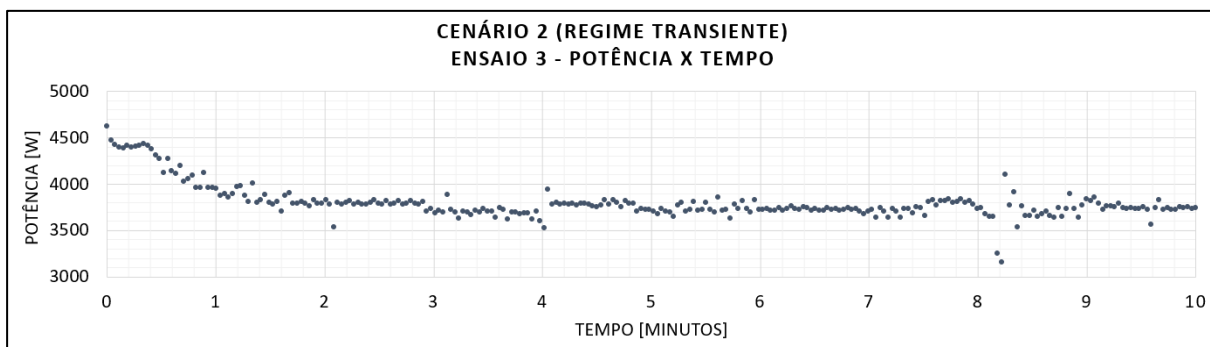


Gráfico 40. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 3 (Cenário 2) em regime transiente.

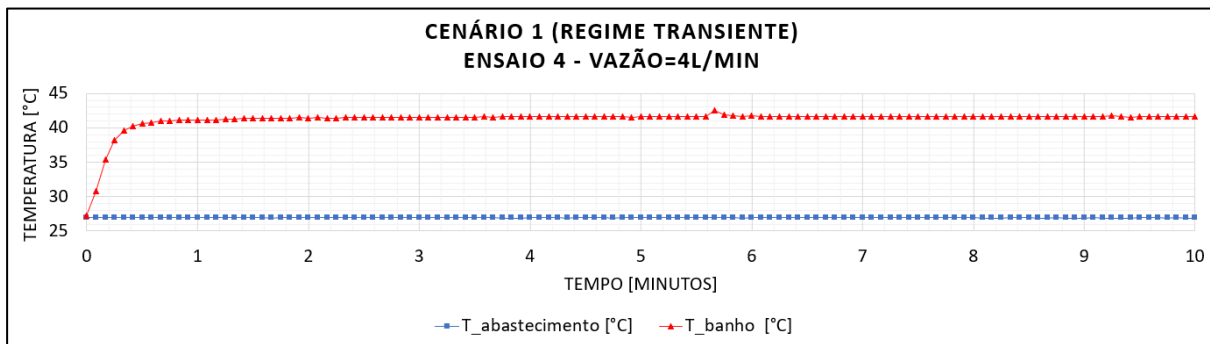


Gráfico 41. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 4 (Cenário 1) em regime transiente.

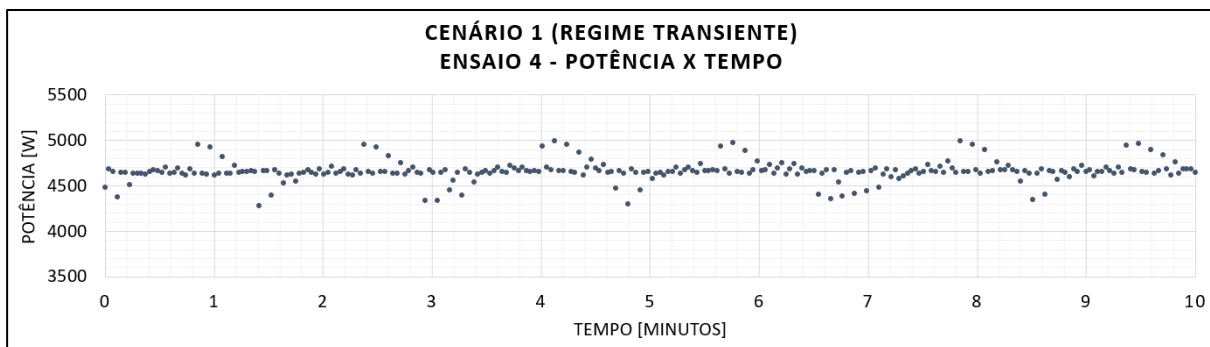


Gráfico 42. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 4 (Cenário 1) em regime transiente.

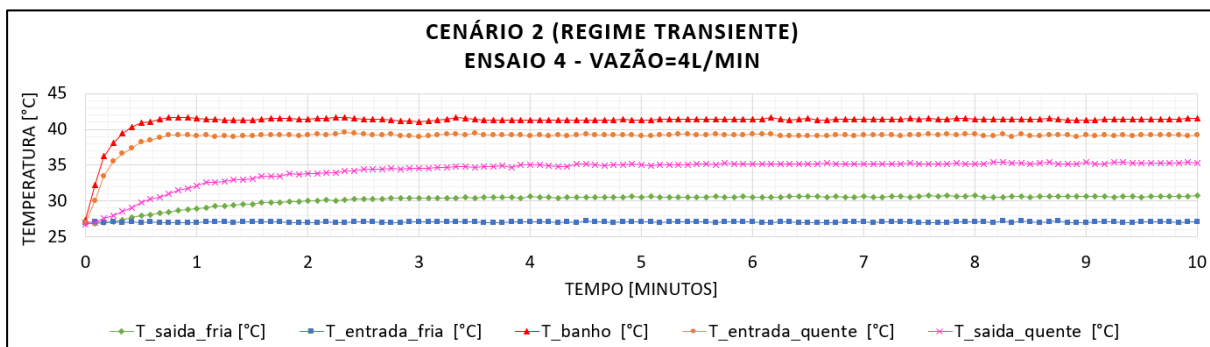


Gráfico 43. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 4 (Cenário 2) em regime transiente.

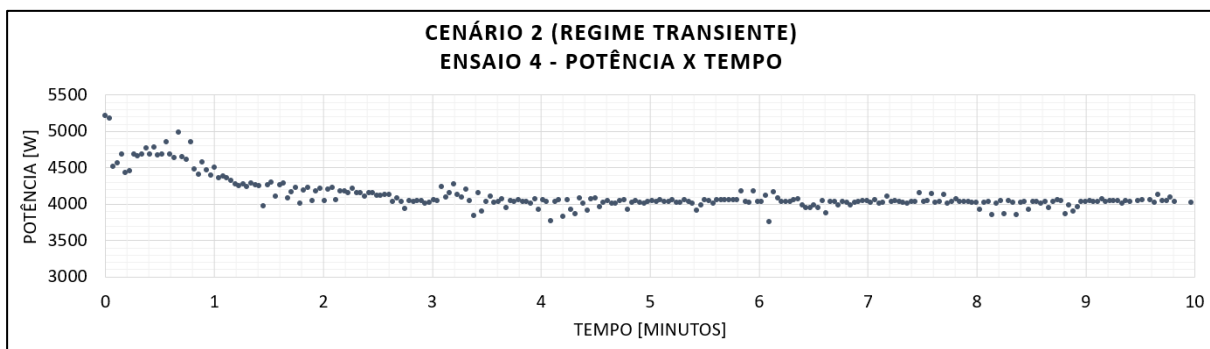


Gráfico 44. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 4 (Cenário 2) em regime transiente.

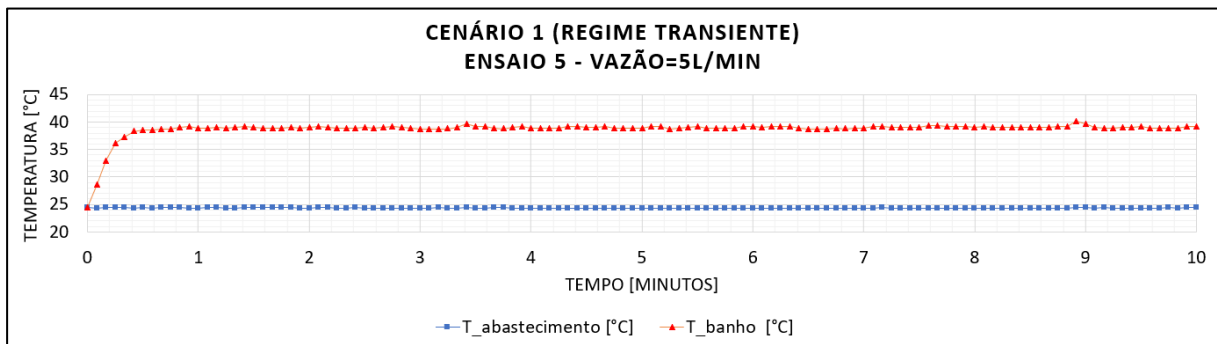


Gráfico 45. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 5 (Cenário 1) em regime transiente.

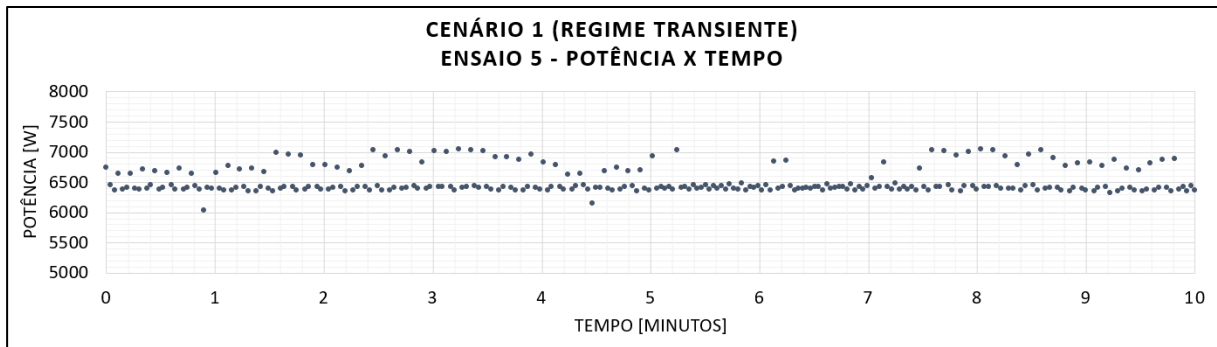


Gráfico 46. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 5 (Cenário 1) em regime transiente.

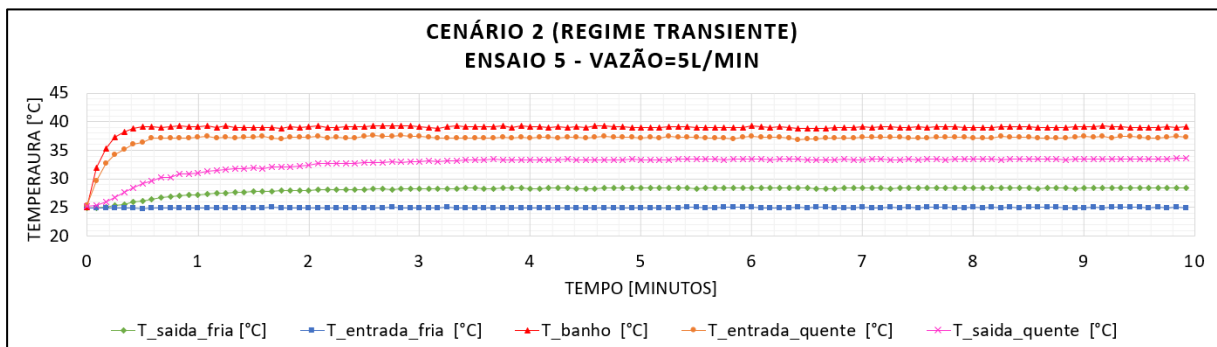


Gráfico 47. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 5 (Cenário 2) em regime transiente.

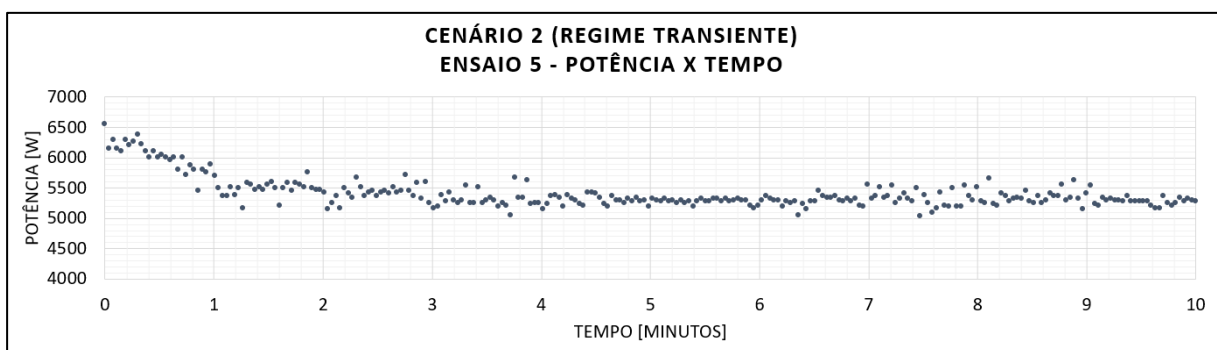


Gráfico 48. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 5 (Cenário 2) em regime transiente.

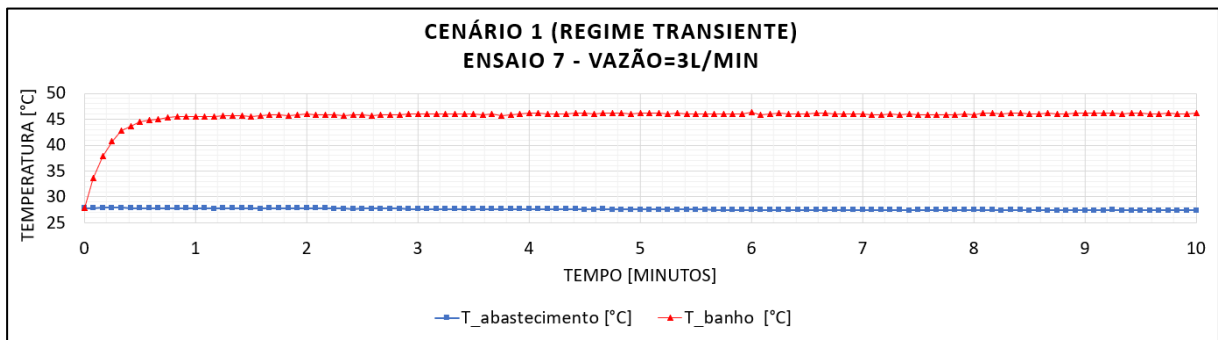


Gráfico 49. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 7 (Cenário 1) em regime transiente.

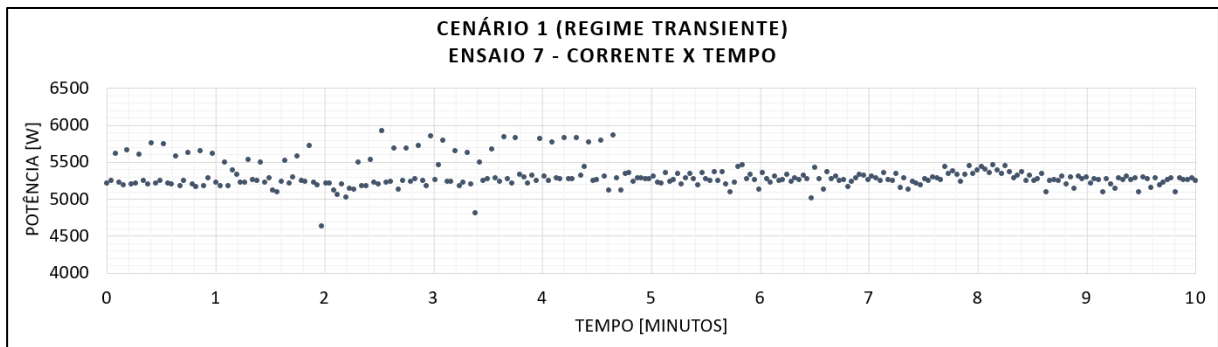


Gráfico 50. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 7 (Cenário 1) em regime transiente.

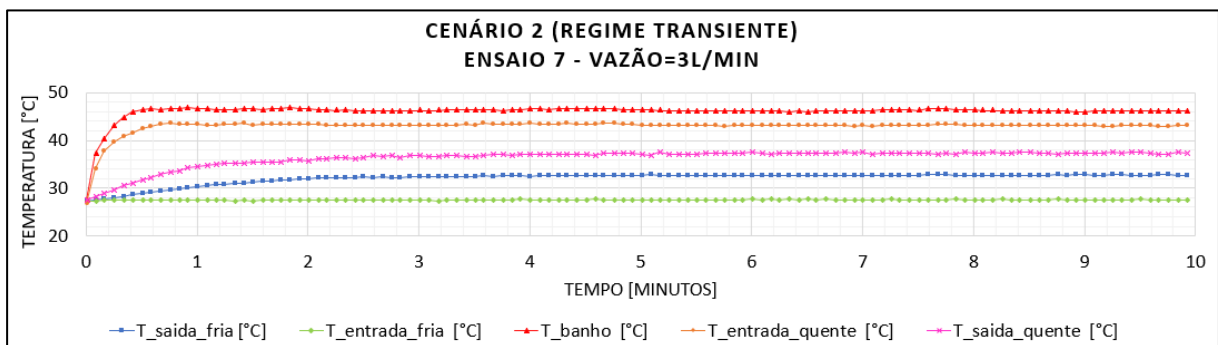


Gráfico 51. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 7 (Cenário 2) em regime transiente.

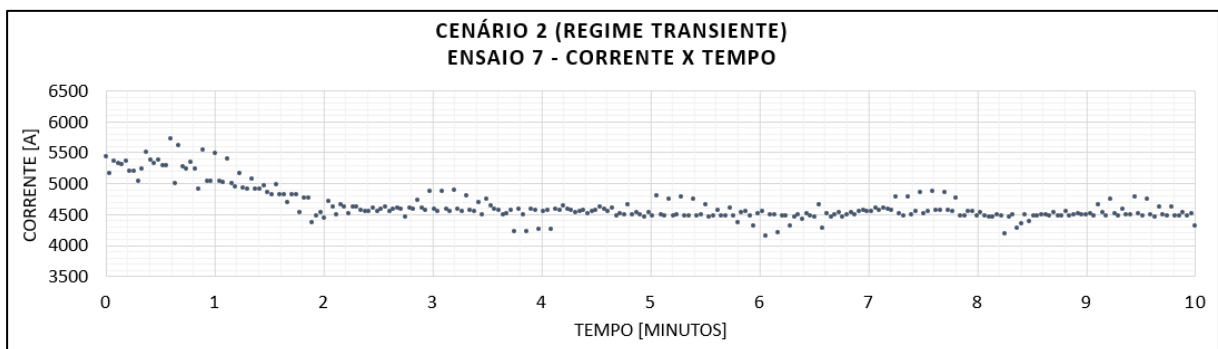


Gráfico 52. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 7 (Cenário 2) em regime transiente.

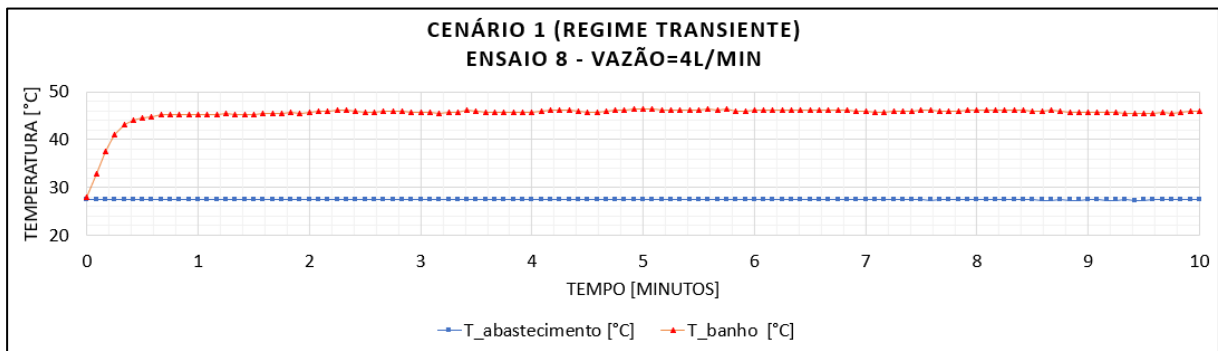


Gráfico 53. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 8 (Cenário 1) em regime transiente.

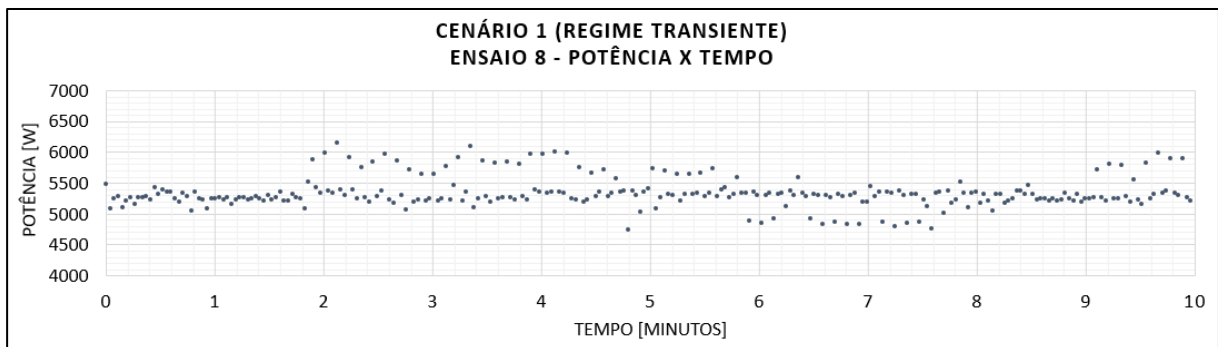


Gráfico 54. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 8 (Cenário 1) em regime transiente.

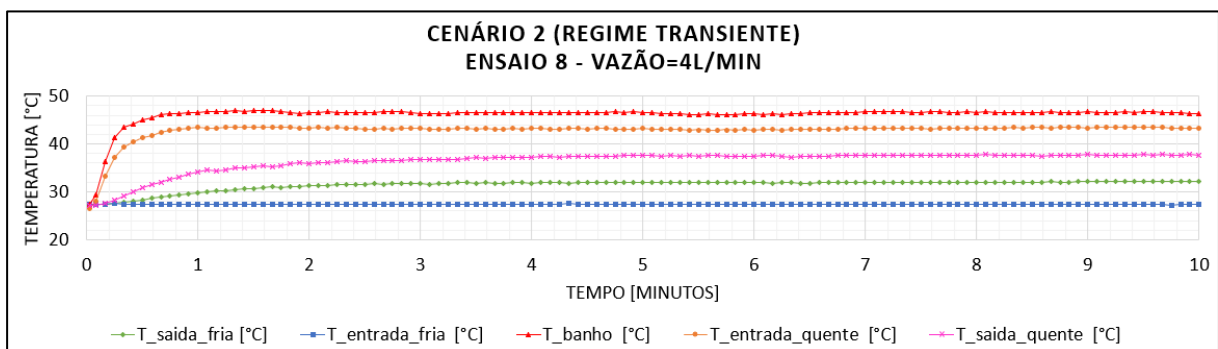


Gráfico 55. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 8 (Cenário 2) em regime transiente.

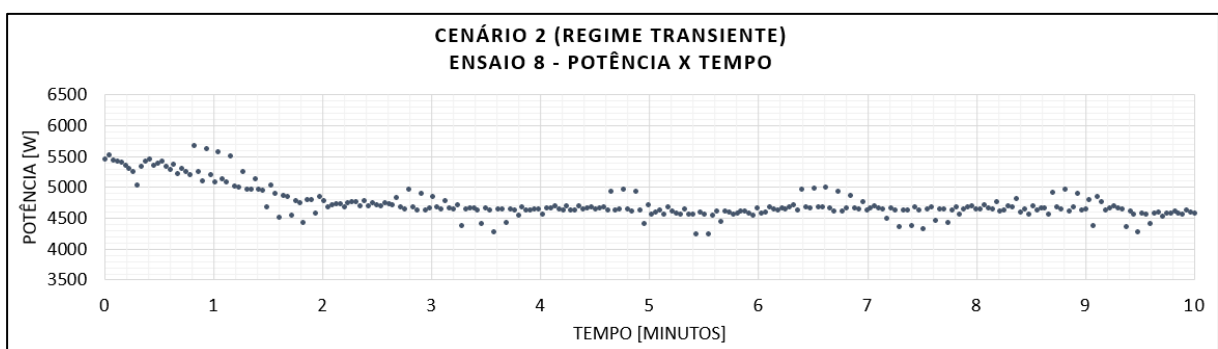


Gráfico 56. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 8 (Cenário 2) em regime transiente.

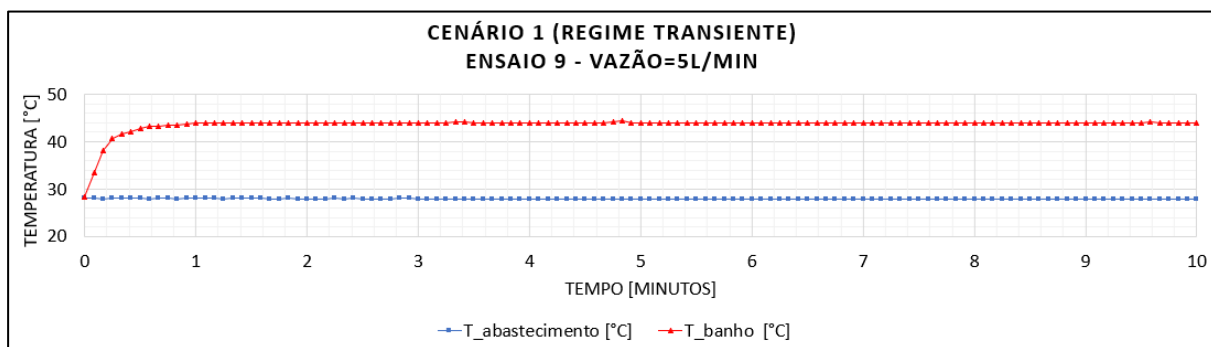


Gráfico 57. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 9 (Cenário 1) em regime transiente.

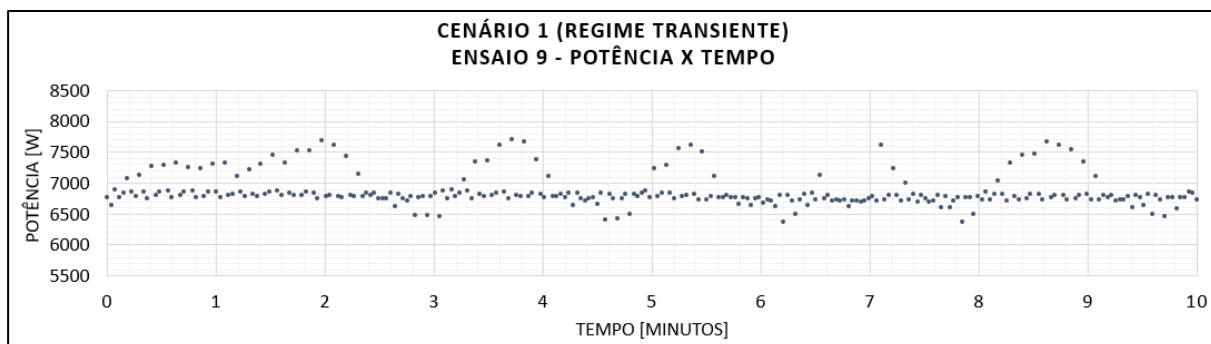


Gráfico 58. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 9 (Cenário 1) em regime transiente.

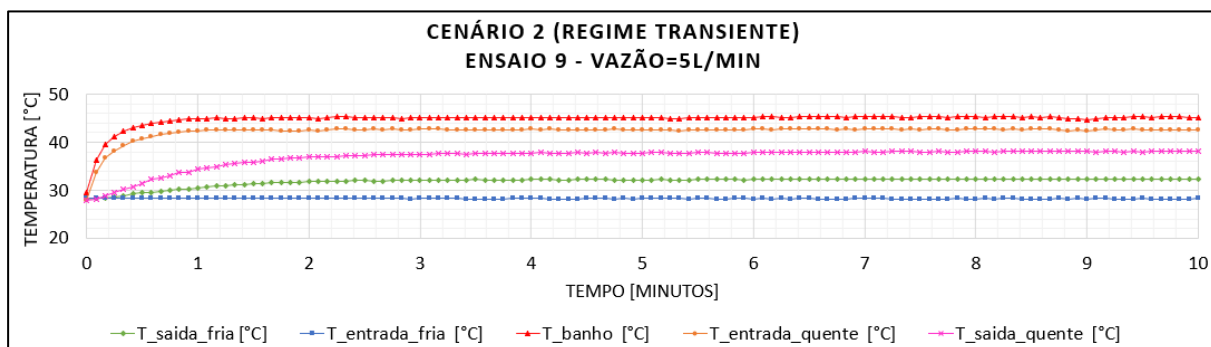


Gráfico 59. Dados obtidos pelos sensores LM35 durante o Ensaio 9 (Cenário 2) em regime transiente.

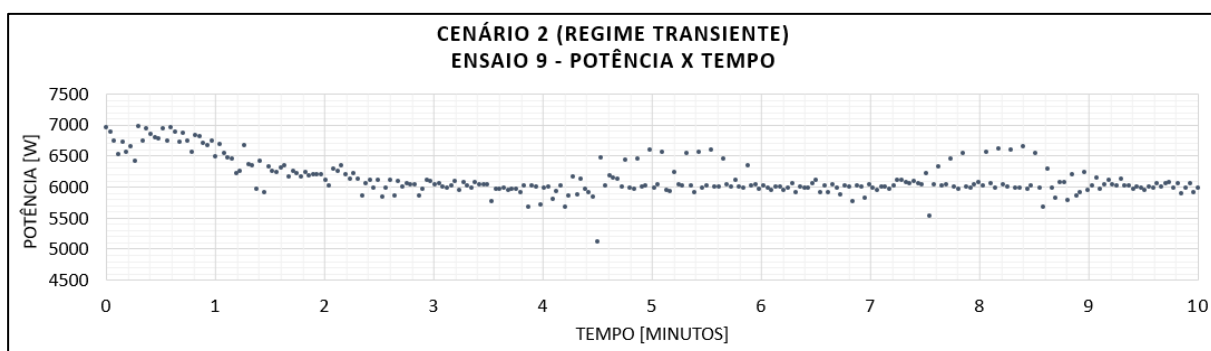


Gráfico 60. Dados obtidos pelo sensor de corrente durante o Ensaio 9 (Cenário 2) em regime transiente.

ANEXOS

| | Pág. |
|-----------|---|
| Anexo I | Especificações Técnicas – Ducha – Exatron 86 |
| Anexo II | Especificações Técnicas – Hidrômetro – Saga 87 |
| Anexo III | Especificações Técnicas – Sensor de Temperatura – National Semiconductor 88 |
| Anexo IV | Especificações Técnicas – Sensor de Corrente–YHDC 89 |
| Anexo V | Especificações Técnicas – Manômetro Digital – Zürich 90 |
| Anexo VI | Especificações Técnicas – Módulo de Aquisição de Dados – Campbell Scientific 91 |
| Anexo VI | Circuito de Divisor de Tensão – Sensor de Corrente – YHDC 92 |

13. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

| | |
|---|------------------------------------|
| MODELO | CHUD2EBC |
| FABRICANTE | Exatron |
| RESISTÊNCIA | Blindada |
| TENSÃO NOMINAL | 220 VCA |
| POTÊNCIA NOMINAL | 7.500 W |
| FREQUÊNCIA NOMINAL | 60 Hz |
| CORRENTE NOMINAL | 32 A |
| DISJUNTOR | 40 A |
| FIAÇÃO MÍNIMA | 6 mm ² |
| EFICIÊNCIA ENERGÉTICA | > 95% |
| RESISTIVIDADE MÍNIMA DA ÁGUA | 1.300 $\Omega \cdot \text{cm}$ *** |
| PRESSÃO MÍNIMA PARA 3 L/MIN | 0,8 m.c.a (8 KPa) |
| PRESSÃO MÍNIMA PARA 1,8 L/MIN | 0,5 m.c.a (4,9 KPa) |
| PRESSÃO MÁXIMA SEM O REGULADOR DE VAZÃO | 4,0 m.c.a (40 KPa) |
| ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA | 35,3 °C |
| GRAU DE PROTEÇÃO DA DUCHA | IP24 |
| CONSUMO MENSAL MÁXIMO* | 30,6 kwh |
| CONSUMO MENSAL MÍNIMO** | 9,6 kwh |

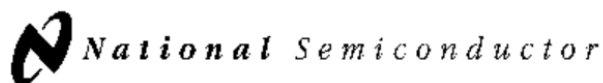
***Consumo mensal máximo** de energia elétrica para um banho diário de 8 minutos com uma vazão de 3,0 l/min e elevação de temperatura de 29,8°C é de 30,6 kWh.

****Consumo mensal mínimo** de energia elétrica para um banho diário de 8 minutos com uma vazão de 3,0 l/min e elevação de temperatura de 10,0 °C é de 9,6 kWh.

***Por possuir resistência blindada a ducha opera com qualquer resistividade de água, porém a resistividade informada é recomendada como um parâmetro de segurança associada.



| ESPECIFICAÇÕES METROLÓGICAS / CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS | | | | | |
|---|----------|----------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Modelo | | Unid. | US-1,5 | US-3,0 | US-5,0 |
| Vazão Nominal (Qn) | | m³/h | 0,75 | 1,5 | 2,5 |
| Vazão Máxima (Qmáx) | | m³/h | 1,5 | 3 | 5,0 |
| Vazão de Transição (Qt) | Classe A | l/h | 75 | 150 | 250 |
| | Classe B | l/h | 60 | 120 | 200 |
| | Classe C | l/h | - | 22,5 | 37,5 |
| Vazão Mínima (Qmin) | Classe A | l/h | 30 | 40 | 100 |
| | Classe B | l/h | 15 | 30 | 50 |
| | Classe C | l/h | - | 15 | 25 |
| Classe | | - | B-H ou B-H/A-V | C-H ou C-H/B-V ou B-H ou B-H/A-V | C-H ou C-H/B-V ou B-H ou B-H/A-V |
| Início de Funcionamento | | l/h | 6 | 7 | 11 |
| Perda de Carga Máxima - em Qmax | | bar | 0,42 | 0,62 | <1 |
| Pressão Máxima de Trabalho | | bar | 10 | | |
| Temperatura Máxima de Trabalho | | C° | 40 / 90 * | | |
| Leitura Mínima/ Resolução | | l | 0,002 | | |
| Leitura Máxima | | m3 | 9.999,99998 ou 99.999,99998 | | |
| Saída de Pulsos | | Pulsos/l | 1 | | |
| * Temperatura máxima de trabalho de 90 °C para medidores água quente. | | | | | |



November 2000

LM35

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

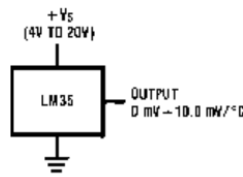
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in $^{\circ}$ Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/2^{\circ}\text{C}$ at room temperature and $\pm 1/2^{\circ}\text{C}$ over a full -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\text{ }\mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^{\circ}\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

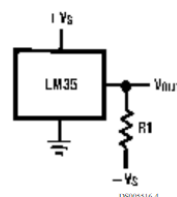
- n Calibrated directly in $^{\circ}$ Celsius (Centigrade)
- n Linear $+10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ scale factor
- n 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^{\circ}\text{C}$)
- n Rated for full -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ range
- n Suitable for remote applications
- n Low cost due to wafer-level trimming
- n Operates from 4 to 30 volts
- n Less than $60\text{ }\mu\text{A}$ current drain
- n Low self-heating, 0.08°C in still air
- n Nonlinearity only $\pm 1/2^{\circ}\text{C}$ typical
- n Low impedance output, $0.1\text{ }\Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



DS005516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
($+2^{\circ}\text{C}$ to $+150^{\circ}\text{C}$)



DS005516-4

Choose $R1 = -V_S/50\text{ }\mu\text{A}$
 $V_{OUT} = 1,500\text{ mV at } +150^{\circ}\text{C}$
 $= +250\text{ mV at } +25^{\circ}\text{C}$
 $= -550\text{ mV at } -55^{\circ}\text{C}$

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

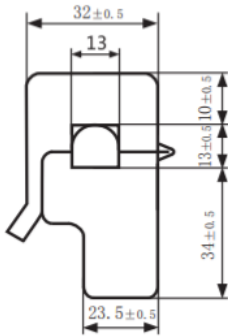
SPECIFICATION

Customer Title : XiDi Technology Product Name: Splilt-core current
Manufacture Model : SCT-013-000 transformer

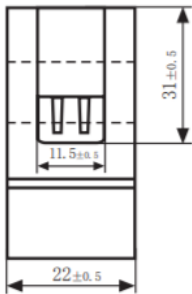
Charateristics: open size:13mm×13mm
1m leading wire
Core material:Ferrite
Fire resistance property:in accordance with
UL 94-V0
Dielectric strength: 1000V AC/1min 5mA
(between shell and output)



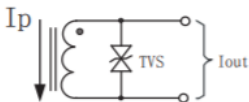
Outline size diagram:(in mm)



Front View



Side View



TVS: Transient-voltage Suppressor
Current output type

Schematic Diagram

Typical table of technical parameters:

| input current | output voltage | non-linearity | build-in sampling resistance (R _L) |
|---------------|------------------|------------------|--|
| 0-100A | 0-50mV | ±3% | Ω |
| turn ratio | resistance grade | work temperature | dielectric strength(between shell and output) |
| 100A:0.05A | Grade B | -25℃~+70℃ | 1000V AC/1min 5mA |

Customer Sign:

Beijing YaoHuadechang Electronic Co.,Ltd
Phone: 0355-7929499-803
Cell: 13693334514
Contact Name: Engineer Chen

Approve Sign:Chenjianping

2011-7-26

ZÜRICH

Z.10.B



• **Manômetro digital**

Tipos:

- Z.10.B-A5 (0,05% F.E. precisão)
- Z.10.B-A4 (0,10% F.E. precisão)
- Z.10.B-A3 (0,25% F.E. precisão)
- Z.10.B-A2 (0,5% F.E. precisão)

Características:

- Faixas: desde vácuo até 1600 bar
- Totalmente em Aço Inox AISI 304
- Acabamento invólucro: polido
- Ø nominal 100 mm
- Display LCD 5 dígitos
- Luz para iluminação do display configurável
- Ligação: vertical (reto)
- Registro de Pico máx e mín
- Conexões: Roscadas NPT ou BSP
- 9 unidades de engenharia selecionáveis (Bar, Kpa, Atm, Kgf/cm², Psi, mmhg, inhg, mh2o, fth2o)
- Tecla Liga/Desliga
- Desligamento automático configurável de 1 a 30 min

Performance:

- Precisão 0,05% F.E. / 0,10% F.E. / 0,25% F.E. (repetibilidade, histerese, linearidade e temperatura até 70°C)
 - Sensor Piezoresistivo
 - Temperatura do invólucro 60°C (máx)
 - Temperatura máxima do sensor 100°C
 - Grau de proteção IP-65 (totalmente protegido contra poeira, jatos d'água)
 - Visor em policarbonato alta resistência
 - Alimentação: 4 pilhas AA (alcalinas)
 - Duração maior que 4500 horas.*
- (* Com a luz de display apagada e atualização do display de 1/seg.)

CR1000 Specifications

Electrical specifications are valid over a -25° to +50°C, non-condensing environment, unless otherwise specified. Recalibration recommended every three years. Critical specifications and system configuration should be confirmed with Campbell Scientific before purchase.

PROGRAM EXECUTION RATE

10 ms to one day @ 10 ms increments

ANALOG INPUTS (SE1-SE16 or DIFF1-DIFF8)

8 differential (DF) or 16 single-ended (SE) individually configured input channels. Channel expansion provided by optional analog multiplexers.

RANGES and RESOLUTION: Basic resolution (Basic Res) is the A/D resolution of a single A/D conversion. A DF measurement with input reversal has better (finer) resolution than Basic Res.

| Range (mV) ¹ | DF Res (μV) ² | Basic Res (μV) |
|-------------------------|--------------------------|----------------|
| ±5000 | 667 | 1333 |
| ±2500 | 333 | 667 |
| ±250 | 33.3 | 66.7 |
| ±25 | 3.33 | 6.7 |
| ±7.5 | 1.0 | 2.0 |
| ±2.5 | 0.33 | 0.67 |

¹Range overhead of ~9% on all ranges guarantees that full-scale values will not cause over range.

²Resolution of DF measurements with input reversal.

ACCURACY³:

±(0.06% of reading + offset), 0° to 40°C

±(0.12% of reading + offset), -25° to 50°C

±(0.18% of reading + offset), -55° to 85°C (-XT option only)

³Accuracy does not include the sensor and measurement noise. Offsets are defined as:

Offset for DF w/input reversal = 1.5·Basic Res + 1.0 μV

Offset for DF w/o input reversal = 3·Basic Res + 2.0 μV

Offset for SE = 3·Basic Res + 3.0 μV

ANALOG MEASUREMENT SPEED:

| Integration Type/Code | Integration Time | Settling Time | Total Time ⁴ | |
|-----------------------|------------------|---------------|-------------------------|-----------------|
| | | | SE w/ No Rev | DF w/ Input Rev |
| 250 | 250 μs | 3 ms | ~1 ms | ~12 ms |
| 60 Hz ⁵ | 16.67 ms | 3 ms | ~20 ms | ~40 ms |
| 50 Hz ⁵ | 20.00 ms | 3 ms | ~25 ms | ~50 ms |

⁴Includes 250 μs for conversion to engineering units.

⁵AC line noise filter.

INPUT NOISE VOLTAGE: For DF measurements with input reversal on ±2.5 mV input range (digital resolution dominates for higher ranges).

250 μs Integration: 0.34 μV RMS

50/60 Hz Integration: 0.19 μV RMS

INPUT LIMITS: ±5 Vdc

DC COMMON MODE REJECTION: >100 dB

NORMAL MODE REJECTION: 70 dB @ 60 Hz when using 60 Hz rejection

INPUT VOLTAGE RANGE W/O MEASUREMENT

CORRUPTION: ±8.6 Vdc max.

SUSTAINED INPUT VOLTAGE W/O DAMAGE: ±16 Vdc max.

INPUT CURRENT: ±1 nA typical, ±6 nA max. @ 50°C;

±90 nA @ 85°C

INPUT RESISTANCE: 20 GΩ typical

ACCURACY OF BUILT-IN REFERENCE JUNCTION

THERMISTOR (for thermocouple measurements):

±0.3°C, -25° to 50°C

±0.8°C, -55° to 85°C (-XT option only)

ANALOG OUTPUTS (VX1-VX3)

3 switched voltage, sequentially active only during measurement.

RANGE AND RESOLUTION:

| Channel | Range | Resolution | Current Source/Sink |
|----------|----------|------------|---------------------|
| (VX 1~3) | ±2.5 Vdc | 0.67 mV | ±25 mA |

ANALOG OUTPUT ACCURACY (VX):

±(0.06% of setting + 0.8 mV), 0° to 40°C

±(0.12% of setting + 0.8 mV), -25° to 50°C

±(0.18% of setting + 0.8 mV), -55° to 85°C (-XT only)

VX FREQUENCY SWEEP FUNCTION: Switched outputs provide a programmable swept frequency, 0 to 2500 mV square waves for exciting vibrating wire transducers.

PERIOD AVERAGE

Any of the 16 SE analog inputs can be used for period averaging. Accuracy is ±(0.01% of reading + resolution), where resolution is 136 ns divided by the specified number of cycles to be measured.

INPUT AMPLITUDE AND FREQUENCY:

| Voltage Gain | Input Range (±mV) | Signal (peak to peak) | | Min Pulse Width (μV) | Max ⁸ Freq (kHz) |
|--------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| | | Min. (mV) ⁶ | Max ⁷ (V) ⁷ | | |
| 1 | 250 | 500 | 10 | 2.5 | 200 |
| 10 | 25 | 10 | 2 | 10 | 50 |
| 33 | 7.5 | 5 | 2 | 62 | 8 |
| 100 | 2.5 | 2 | 2 | 100 | 5 |

⁶Signal centered around Threshold (see PeriodAvg() instruction).

⁷With signal centered at the datalogger ground.

⁸The maximum frequency = 1/(twice minimum pulse width) for 50% of duty cycle signals.

RATIOMETRIC MEASUREMENTS

MEASUREMENT TYPES: Provides ratiometric resistance measurements using voltage excitation. 3 switched voltage excitation outputs are available for measurement of 4- and 6-wire full bridges, and 2-, 3-, and 4-wire half bridges. Optional excitation polarity reversal minimizes dc errors.

RATIOMETRIC MEASUREMENT ACCURACY:^{9,10,11}

±(0.04% of Voltage Measurement + Offset)

⁹Accuracy specification assumes excitation reversal for excitation voltages < 1000 mV. Assumption does not include bridge resistor errors and sensor and measurement noise.

¹⁰Estimated accuracy, ΔX (where X is value returned from the measurement with Multiplier = 1, Offset = 0):

BrHalf() instruction: ΔX = ΔV_X/V_X

BrFull() instruction: ΔX = 1000·ΔV_X/V_X, expressed as mV·V⁻¹.

ΔV⁻¹ is calculated from the ratiometric measurement accuracy. See Resistance Measurements Section in the manual for more information.

¹¹Offsets are defined as:

Offset for DIFF w/input reversal = 1.5·Basic Res + 1.0 μV

Offset for DIFF w/o input reversal = 3·Basic Res + 2.0 μV

Offset for SE = 3·Basic Res + 3.0 μV

Excitation reversal reduces offsets by a factor of two.

PULSE COUNTERS (P1-P2)

2 inputs individually selectable for switch closure, high frequency pulse, or low-level ac. Independent 24-bit counters for each input.

MAXIMUM COUNTS PER SCAN: 16.7x10⁶

SWITCH CLOSURE MODE:

Minimum Switch Closed Time: 5 ms

Minimum Switch Open Time: 6 ms

Max. Bounce Time: 1 ms open w/o being counted

HIGH-FREQUENCY PULSE MODE:

Maximum Input Frequency: 250 kHz

Maximum Input Voltage: ±20 V

Voltage Thresholds: Count upon transition from below 0.9 V to above 2.2 V after input filter with 1.2 μs time constant.

LOW-LEVEL AC MODE: Internal ac coupling removes ac offsets up to ±0.5 Vdc.

Input Hysteresis: 12 mV RMS @ 1 Hz

Maximum ac Input Voltage: ±20 V

Minimum ac Input Voltage:

| Sine Wave (mV RMS) | Range(Hz) |
|--------------------|---------------|
| 20 | 1.0 to 20 |
| 200 | 0.5 to 200 |
| 2000 | 0.3 to 10,000 |
| 5000 | 0.3 to 20,000 |

DIGITAL I/O PORTS (C1-C8)

8 ports software selectable, as binary inputs or control outputs. Provide on/off, pulse width modulation, edge timing, subroutine interrupts / wake up, switch closure pulse counting, high frequency pulse counting, asynchronous communications (UARTs), and SDI-12 communications. SDM communications are also supported.

LOW FREQUENCY MODE MAX: <1 kHz

HIGH-FREQUENCY MODE MAX: 400 kHz

SWITCH-CLOSURE FREQUENCY MAX: 150 Hz

EDGE TIMING RESOLUTION: 540 ns

OUTPUT VOLTAGES (no load): high 5.0 V ±0.1 V; low <0.1

OUTPUT RESISTANCE: 330 Ω

INPUT STATE: high 3.8 to 16 V; low -8.0 to 1.2 V

INPUT HYSTERESIS: 1.4 V

INPUT RESISTANCE: 100 kΩ with inputs <6.2 Vdc

0.220 kΩ with inputs ≥6.2 Vdc

SERIAL DEVICE/RS-232 SUPPORT: 0 TO 5 Vdc UART

SWITCHED 12 VDC (SW-12)

1 independent 12 Vdc unregulated source is switched on and off under program control. Thermal fuse hold current = 900 mA at 20°C, 650 mA at 50°C, 360 mA at 85°C.

COMPLIANCE INFORMATION

VIEW EU DECLARATION OF CONFORMITY AT:

www.campbellsci.com/cr1000

www.campbellsci.com/cr1000kd

COMMUNICATIONS

RS-232 PORTS:

DCE 9-pin: (not electrically isolated) for computer connection or connection of modems not manufactured by Campbell Scientific.

COM1 to COM4: 4 independent Tx/Rx pairs on control ports (non-isolated); 0 to 5 Vdc UART

Baud Rates: selectable from 300 bps to 115.2 kbps.

Default Format: 8 data bits; 1 stop bits; no parity

Optional Formats: 7 data bits; 2 stop bits; odd, even parity

CS I/O PORT: Interface with telecommunications peripherals manufactured by Campbell Scientific.

SDI-12: Digital control ports C1, C3, C5, and C7 are individually configured and meet SDI-12 Standard v 1.3 for datalogger mode. Up to 10 SDI-12 sensors are supported per port.

PERIPHERAL PORT: 40-pin interface for attaching CompactFlash or Ethernet peripherals

PROTOCOLS SUPPORTED: PakBus, AES-128 Encrypted PakBus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, HTML, POP3, PPP, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM, TLS.

SYSTEM

PROCESSOR: Renesas H8S 2322 (16-bit CPU with 32-bit internal core running at 7.3 MHz)

MEMORY: 2 MB of flash for operating system; 4 MB of battery-backed SRAM for CPU usage and final data storage; 512 kB flash disk (CPU) for program files.

REAL-TIME CLOCK ACCURACY: ±3 min. per year.

Correction via GPS optional.

REAL-TIME CLOCK RESOLUTION: 10 ms

SYSTEM POWER REQUIREMENTS

VOLTAGE: 9.6 to 16 Vdc

INTERNAL BATTERIES: 1200 mAh lithium battery for clock and SRAM backup that typically provides three years of backup

EXTERNAL BATTERIES: Optional 12 Vdc nominal alkaline and rechargeable available. Power connection is reverse polarity protected.

TYPICAL CURRENT DRAIN at 12 Vdc:

Sleep Mode: < 1 mA

1 Hz Sample Rate (1 fast SE measurement): 1 mA

100 Hz Sample Rate (1 fast SE measurement): 16 mA

100 Hz Sample Rate (1 fast SE measurement w/RS-232 communication): 28 mA

Active external keyboard display adds 7 mA (100 mA with backlight on).

PHYSICAL

DIMENSIONS: 23.9 x 10.2 x 6.1 cm (9.4 x 4 x 2.4 in); additional clearance required for cables and leads.

MASS/WEIGHT: 1 kg / 2.1 lb

WARRANTY

3 years against defects in materials and workmanship.



Campbell Scientific, Inc. | 815 W 1800 N | Logan, UT 84321-1784 | (435) 227-9120 | www.campbellsci.com
USA | AUSTRALIA | BRAZIL | CANADA | CHINA | COSTA RICA | FRANCE | GERMANY | SE ASIA | SOUTH AFRICA | SPAIN | UK

© 2004, 2017
Campbell Scientific, Inc.
December 18, 2017

